

FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS

CURSO: ENGENHARIA CIVIL

Vinicius Maciel Cunha

2094523/7

Avaliação experimental da mistura solo-cimento para aplicação em camadas de base de pavimentação.

Brasília

2014

VINÍCIUS MACIEL CUNHA

Avaliação experimental da mistura solo-cimento para aplicação em camadas de base de pavimentação.

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a
conclusão do curso de Engenharia
Civil do UniCEUB - Centro
Universitário de Brasília

Orientador: JAIRO FURTADO NOGUEIRA, M.Sc.

Brasília

2014

VINÍCIUS MACIEL CUNHA

Avaliação experimental da mistura solo-cimento para aplicação em camadas de base de pavimentação.

Trabalho de Curso (TC) apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB - Centro Universitário de Brasília

Orientador: JAIRO FURTADO NOGUEIRA, M.Sc

Brasília, 1 de Dezembro de 2014.

Banca Examinadora

Eng°. Civil: Jairo Furtado Nogueira, M.Sc. UniCeub

Orientador

Eng.^a. Civil: Maruska Tatiana Nascimento da Silva, D.Sc. UniCeub

Examinador Interno

Eng°. de Fortificação e Construção : Giuseppe Miceli Junior, M.Sc, I. IESPLAN

Examinador Externo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GERAL.....	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	HISTÓRICOS DA PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL	4
3.2	PAVIMENTAÇÕES ATUAIS NO BRASIL.....	4
3.3	CONCEITO E ESTRUTURA DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA	7
3.3.1	Subleito.....	10
3.3.2	Reforço do Subleito	11
3.3.3	Sub-base	11
3.3.4	Base	11
3.3.5	Revestimento.....	12
3.4	SOLO-CIMENTO.....	13
3.4.1	Surgimento do solo-cimento	13
3.4.2	Solo com adição de cimento.....	14

3.5	CIMENTO PORTLAND.....	15
3.5.1	Propriedades do cimento Portland.....	15
3.5.2	Fabricação do cimento Portland	16
3.5.3	Composição química	16
3.5.4	Tipos de cimentos Portland	17
3.6	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	18
3.6.1	A estabilização do solo com cimento.....	19
3.7	MATERIAIS UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO E NORMATIZAÇÃO.....	20
4	MATERIAIS E METODOLOGIA DE TRABALHO	23
4.1	LOCALIZAÇÃO E ORIGEM DOS MATERIAIS.....	24
4.1.1	Solo.....	24
4.1.2	Cimento	25
4.1.3	Água	26
4.2	METODOLOGIA.....	26
4.2.1	Análise granulométrica do solo.....	28
4.2.2	Ensaio de compactação	38
4.2.3	Índice de suporte Califórnia e expansão.....	44
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	51
5.1	GRANULOMETRIA	51

5.2	COMPACTAÇÃO	59
5.2.1	Solo Natural (sem adição de cimento)	60
5.2.2	Solo com 6% de cimento	61
5.2.3	Solo com 8% de cimento	62
5.2.4	Solo com 10% de cimento	63
5.3	ISC – ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA.....	65
5.4	ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES	65
5.5	CONDIÇÕES ESPECÍFICAS DO SOLO	67
6	CONCLUSÃO	69
6.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Extensão da malha rodoviária.....	5
Figura 2 - Evolução da extensão das rodovias federais pavimentadas – Brasil / 2014 - 2014 (Valores em mil km)	6
Figura 3 - Esforços em camadas de pavimento.	8
Figura 4 - Estruturas dos pavimentos.....	9
Figura 5 - Distribuição de cargas nos pavimentos rígido e flexível.....	10
Figura 6 - Seção transversal do pavimento	12
Figura 7 - Disposição das camadas da pavimentação	13
Figura 8 - Materiais cimentados empregados em base, sub-bases ou reforços.	14
Figura 9 - Exemplo de cimento Portland	15
Figura 10 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.....	20
Figura 11 - Representação da metodologia utilizada	24
Figura 12 - Localização do ponto de coleta das amostras	25
Figura 13 - Cimento CP II E 32	26
Figura 14 - Processo de destorroamento	27
Figura 15 - Passagem da amostra destorroadada na peneira nº4 (4.8mm).....	28
Figura 16 - Quarteamento do material	29
Figura 17 - Peneiras para granulometria grossa	29

Figura 18 - Execução do peneiramento grosso.....	30
Figura 19 - Execução do peneiramento fino.....	30
Figura 20 – Processo de sedimentação do material em análise	31
Figura 21 - Umidade higroscópica.....	32
Figura 22 - Procedimento de determinação da massa específica do solo	33
Figura 23 - Representação dos estados e dos limites.....	34
Figura 24 - Índice de plasticidade.....	34
Figura 25 - Aparelho Casagrande	35
Figura 26 - Determinação do limite de liquidez (ABNT NBR 6459/82)	36
Figura 27 - Fases do ensaio do limite de plasticidade (ABNT NBR 180/84)	37
Figura 28 - Medidas dos cilindros.....	39
Figura 29 - Pesagem do cimento na balança de precisão	40
Figura 30 - Pesagem da água para homogeneização da mistura	40
Figura 31 - Mistura de solo com cimento para compactação	41
Figura 32 - Molde cilíndrico	42
Figura 33 - Processo de compactação com utilização do soquete.....	43
Figura 34 - Moldes cilíndricos, régua metálica, filtro de papel e soquete utilizados no processo de compactação.....	44
Figura 35 - Material separado para compactação na umidade ótima.....	45

Figura 36 - Cilindro compactado na umidade ótima	45
Figura 37 - Cilindros imersos em água para leitura da expansão	46
Figura 38 – Tentativa de retirada da amostra do cilindro metálico por meio da prensa.	47
Figura 39 - Desmolde das amostras compactadas (a) pistão para desmoldagem e (b) amostra retirada do cilindro	48
Figura 40 - Umidificação da amostra compactada	49
Figura 41 - Pesagem das amostras recém-retiradas dos moldes cilíndricos (a) amostra com 6% de cimento, (b) amostra com 8% de cimento e (c) amostra com 10% de cimento.....	49
Figura 42 - Obtenção da força máxima atingida pela amostra compactada de solo-cimento em uma prensa de compressão simples.	50
Figura 43 - Curva granulométrica com e sem defloculante	53
Figura 44 - Curva para cálculo do limite de liquidez	56
Figura 45 - Curva obtida do ensaio de compactação indicando a umidade ótima para o solo natural.....	60
Figura 46 - Curva obtida do ensaio de compactação indicando a umidade ótima para o solo com mistura de 6% de cimento.....	61
Figura 47 - Curva obtida do ensaio de compactação indicando a umidade ótima para o solo com mistura de 8% de cimento.....	62
Figura 48 – Curva obtida do ensaio de compactação indicando a umidade ótima para o solo com mistura de 10% de cimento.....	63

Figura 49 - Curvas para comparação das umidades ótimas e densidades máximas com misturas de 6%, 8%, 10% e natural.....64

Figura 50 - Comparação gráfica das resistências de compressão.....66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Frota total de veículos por região – Brasil/ 2004 e 2014	7
Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland.....	17
Tabela 3 - Composição dos cimentos Portland comuns e compostos.	18
Tabela 4 - Granulometria para base granular.....	21
Tabela 5 - Componentes químicos do cimento	26
Tabela 6 - Peneiramento grosso do solo.....	51
Tabela 7 - Peneiramento fino com defloculante	52
Tabela 8 - Peneiramento fino sem defloculante	52
Tabela 9 - Tabela de sedimentação (a) com defloculante e (b) sem defloculante. ...	52
Tabela 10 - Granulometria do solo analisado.....	54
Tabela 11 - Resultados para umidade higroscópica	55
Tabela 12 - Resultado para massa específica dos grãos.....	55
Tabela 13 - Resultados do limite de liquidez.....	55
Tabela 14 - Resultados do limite de plasticidade	56
Tabela 15 - Cálculo do índice de plasticidade (IP)	56
Tabela 16 - Classificação do índice de plasticidade.....	57
Tabela 17 - Tabela para classificação de solos TRB.	58

Tabela 18 - Identificação, dimensões e peso dos moldes cilíndricos utilizados no ensaio de compactação.	59
Tabela 19 - Umidade de compactação das amostras ensaiadas (natural).....	60
Tabela 20 - Umidade de compactação das amostras ensaiadas com mistura de 6% de cimento.....	61
Tabela 21 - Umidade de compactação das amostras ensaiadas com mistura de 8% de cimento.....	62
Tabela 22 - Umidade de compactação das amostras ensaiadas com mistura de 10% de cimento.....	63
Tabela 23 - Análise comparativa das umidades ótimas e densidades das misturas de solo-cimento e natural (sem cimento).	64
Tabela 24 - Relação de cargas máximas encontradas para as misturas de solo-cimento e natural.....	66
Tabela 25 - Características do solo.....	67
Tabela 26 - Valores das densidades aparentes e tensões máximas de ruptura obtidas por meio da prensa de compactação simples.	68

ÍNDICE DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP.....	Associação Brasileira de Cimento Portland
BGS	Brita Graduada Simples
DNER.....	Departamento Nacional de Estrada e Rodagens
DNIT.....	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EA.....	Equivalente de Areia
HRB.....	<i>Highway Reserarch Board</i>
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
UNICEUB.....	Centro de ensino Unificado de Brasília

AGRADECIMENTOS

A Deus;

Aos meus pais, pelo amor, carinho e incentivo, sem os quais não teria concluído esse trabalho;

Ao professor Jairo Furtado pelo estímulo, pela paciência, pelos ensinamentos e pela dedicação com que me orientou durante o decorrer do trabalho;

À professora Maruska Tatiana pelos ensinamentos e sugestões durante o trabalho;

Ao João Pedro (G2) pela ajuda e apoio com os ensaios laboratoriais;

Ao Vanilson Gustavo e ao Elizio Filho (Dida) pelo auxílio e paciência durante os trabalhos laboratoriais;

Aos meus amigos pelo apoio prestado para a realização desta pesquisa;

À minha namorada Nailine Moura pelo grande incentivo e apoio nas horas mais difíceis, e principalmente todo carinho e atenção sempre presentes;

Aos meus colegas de trabalho da João Fortes Engenharia que sempre me apoiaram durante todo o processo de realização do trabalho.

RESUMO

Este trabalho estuda o comportamento do solo com adição de cimento tendo em vista determinar a estabilização com o cimento a partir de ensaios práticos realizados em laboratório conforme as normas da ABNT. “O solo melhorado por cimento é empregado principalmente para alterar a plasticidade e melhorar a trabalhabilidade de certos solos em pista ou para atender as especificações granulométricas, atualmente, os órgãos e concessionárias têm voltado a especificar o solo-cimento, mostrando-se novamente como um material para competir com as tradicionais bases granulares de brita graduada simples (BGS) “ (BERNUCCI *et al*, 2007). Para este estudo foi utilizado um tipo de solo característico do Distrito Federal sendo ele um areno siltoso. Com a realização dos ensaios foi possível caracterizar o tipo de cada material e a resistência à compressão. A primeira etapa consistiu na realização dos seguintes ensaios limite de liquidez, limite de plasticidade, massa específica dos grãos, granulometria, compactação, índice de suporte de Califórnia (ISC ou CBR), expansão e compressão axial. Na segunda etapa foram realizados o ensaio de compactação simples com as misturas de solo-cimento variando os teores de massa de cimento em 6%, 8% e 10% na umidade ótima do solo procurando o melhoramento da resistência com fim de uma solução viável na estabilização do solo.

ABSTRACT

This work aims to study the reaction of different types of soil by adding cement, thus seeking to determine a stabilization concerning the thematic of soil with cement, based on practical tests conducted in the laboratory according to the ABNT norms. The soil improved by cement is used primarily to change the plasticity and improve the workability of certain soils on track or to meet the particle size specifications, currently, the organs and dealers have returned to specify the soil cement, showing up again as a material to compete with traditional granular bases of simple graded gravel (BGS)“ (BERNUCCI *et al*, 2007). For this study, we used a type of soil typical of the Distrito Federal, being silt. With the tests, it was possible to characterize the type of each material and compressive strength. The first step consisted in conducting the following tests: liquid limit, plastic limit, specific mass of grains, grain size, compaction, California bearing ratio (CBR) and expansion. In the second step, was performed the test of direct shear with the soil-cement mixtures, varying the levels of cement in the optimum moisture of the soil, seeking to improve the resistance with the purpose of a viable solution for soil stabilization.

1 INTRODUÇÃO

A história do transporte rodoviário brasileiro, utilizando rodovias pavimentadas, teve início no ano de 1861 com a inauguração da primeira estrada de rodagem do Brasil, intitulada Estrada União Indústria, ligando o estado do Rio de Janeiro ao de Minas Gerais. Em meados dos anos 1940 as rodovias brasileiras pavimentadas contavam com singelos 423 km entre rodovias federais e estaduais. (SENAT, 2014)

A má qualidade das rodovias, motivada em parte por uma insuficiente manutenção, oferece riscos a todos os usuários, e principalmente aos que trafegam com veículos de cargas consideradas perigosas. Implica também custos elevados, sobretudo com a operação dos veículos e com a restauração dos pavimentos, o que decorre de um processo de deterioração que requer soluções técnicas mais robustas e onerosas para a reversão deste cenário. (CNT, 2014)

Irregularidades na superfície do pavimento, buracos, trechos destruídos e ausência de acostamento são fatores que podem elevar o risco de acidentes nas rodovias. Além disso, a qualidade do pavimento é um dos principais determinantes do desempenho dos usuários durante suas viagens. (SENAT, 2014)

Dada à importância do transporte rodoviário na movimentação de bens e pessoas no Brasil, são necessários investimentos contínuos visando à manutenção, à recuperação e à ampliação da malha rodoviária pavimentada brasileira. (CNT, 2014)

As estruturas de pavimentos são sistemas de camadas assentes sobre uma fundação chamada subleito. O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre diferentes camadas do pavimento. (BERNUCCI, 2006)

Foi apontado no Brasil que em 50,1 % da extensão total o pavimento encontra-se em estado ótimo (42,4%) ou bom (7,7%). Entretanto, 49,9% apresentam algum tipo de deficiência, de forma que 36,7% do pavimento é classificado como regular; 9,8% como ruim; e 3,4% como péssimo. Os trechos considerados críticos são aqueles avaliados como ruim ou péssimo e atualmente apresentam extensão de 13.017 km. (SENAT, 2014)

Diante desse cenário, a grande motivação deste trabalho é tentar contribuir de alguma forma com a melhoria das estradas do país, apresentando uma avaliação experimental da mistura solo-cimento, com vista viabilizar sua utilização e melhorar as camadas de base de pavimento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como finalidade o estudo da mistura solo-cimento como material componente de um pavimento rodoviário, dentro dos parâmetros técnicos exigidos para sua execução.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. O objetivo principal deste trabalho consiste em verificar a capacidade de suporte de carga e expansividade do solo quando a este é adicionado cimento nos seguintes teores: 6%, 8% e 10%.
- II. Relacionar o teor de cimento de uma mistura solo-cimento e o aumento da resistência quando solicitado por uma carga atuante.
- III. Avaliar se a mistura solo-cimento é um material adequado para compor a base de um pavimento rodoviário.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICOS DA PAVIMENTAÇÃO NO BRASIL

De acordo com Bernucci, (2006), na década de 1940 houve um contato de engenheiros brasileiros com engenheiros norte-americanos que haviam participado da 2ª Guerra Mundial (Belém, Fortaleza, Natal, Recife, Maceió e Salvador) na construção de pistas de aeroportos e estradas de acesso, esse contato garantiu uma melhoria da pavimentação no Brasil, devido à utilização do ensaio recém-desenvolvido CBR - *California Bearing Ratio*, mesmo assim o país possuía uma das menores extensões em rodovias da América Latina, com apenas 1.300km. Entre as décadas de 1940 1950 ocorreu a criação do Fundo Rodoviário Nacional (FRN), que gerou um grande impulso para a construção rodoviária nacional.

Destacado por Prego (2001 apud BERNUCCI, 2006) no ano de 1950, aconteceu o início da execução de pavimentos em escala industrial, como também grandes firmas construtoras começaram a se organizar. Na década de 1955 foi fundada a primeira fábrica de asfalto da Refinaria de Presidente Bernardes da Petrobras, que havia sido criada dois anos antes. E durante os anos de 1958 e 1959 foram criados o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) e a Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv). Já no período de 1964 a 1984 tivemos o destaque dos projetos da Rodovia Transamazônica e da Ponte Rio-Niterói. (BERNUCCI, 2006).

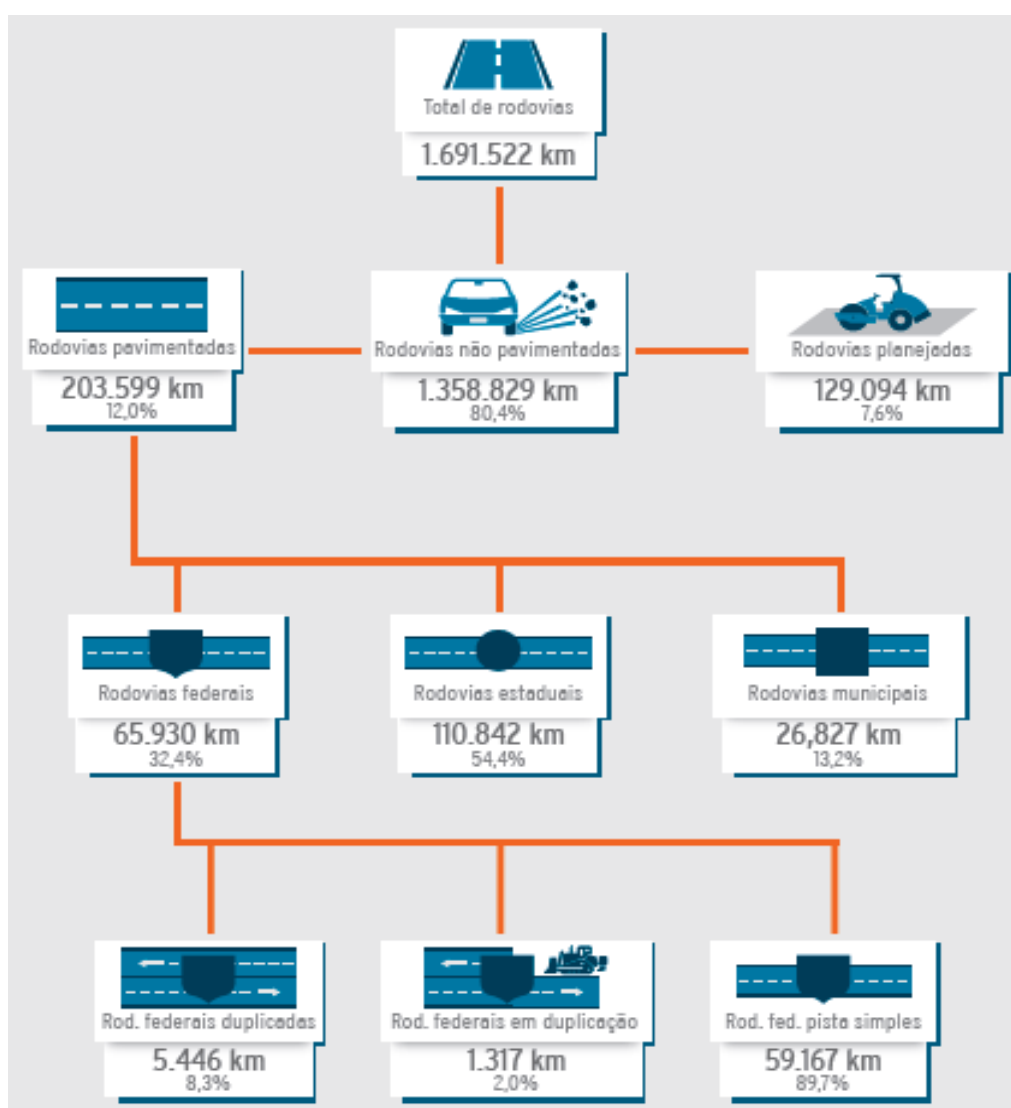
3.2 PAVIMENTAÇÕES ATUAIS NO BRASIL

A história do transporte rodoviário brasileiro, utilizando rodovias pavimentadas, teve início no ano de 1861 com a inauguração da primeira estrada de rodagem do Brasil, intitulada Estrada União Indústria, ligando o estado do Rio de Janeiro ao de Minas Gerais. Em meados dos anos 1940 as rodovias brasileiras pavimentadas contavam com singelos 423 km entre rodovias federais e estaduais. Com o Decreto-Lei nº 8.463/1945, conferia-se autonomia técnica e financeira ao Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER, a Lei Áurea do rodoviarismo brasileiro. Como consequência, impulsionou-se o crescimento da malha rodoviária brasileira, que contava em 1950 com 968 km - o dobro do ano de 1945. A

partir daí, houve um grande crescimento das rodovias nas décadas seguintes, ocasionando a expansão do modal. (SENAT, 2014)

Segundo os dados do Sistema Nacional de Viação – SNV de 2014 existem, no país, 1.691.522 km de rodovias, dos quais apenas 203.599 km são pavimentados, isto é, 12,0% da malha. Das rodovias pavimentadas, 65.930 km são federais. Destas, apenas 8,2% são de pista dupla (5.446 km) e 1,9% (1.316 km) são vias em fase de duplicação; os demais 89,9% são de pista simples (Figura 1). (CNT, 2014)

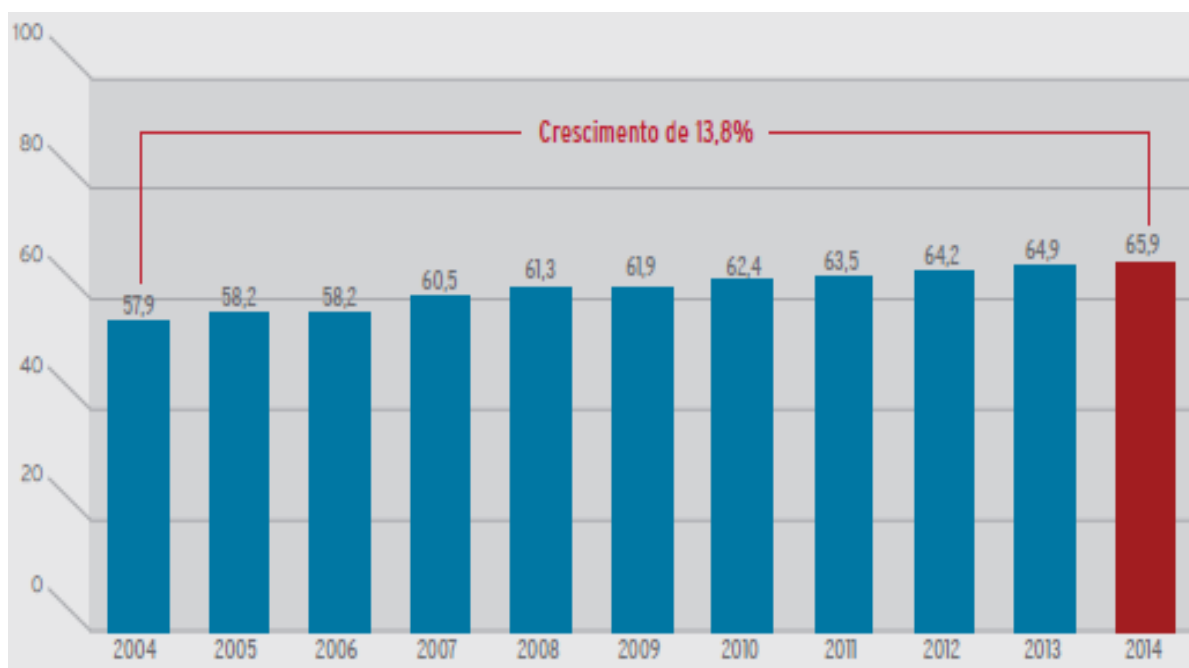
Figura 1 - Extensão da malha rodoviária



Fonte: (CNT, 2014)

Nos últimos dez anos, a extensão da malha rodoviária federal pavimentada cresceu 13,8%, passando de 57,9 mil km no ano de 2004 para pouco mais de 65,9 mil km no ano de 2014 (Figura 2). (CNT, 2014)

Figura 2 - Evolução da extensão das rodovias federais pavimentadas – Brasil / 2014 - 2014 (Valores em mil km)



Fonte: (CNT, 2014)

O Brasil, no que se refere à infraestrutura rodoviária, teve um ínfimo crescimento da sua malha no período de 2004 a 2014 (Figura 2), em comparação com o crescimento da frota de veículos (Tabela 1) e do número de acidentes, que vêm aumentando consideravelmente. Comparativamente, enquanto a malha pavimentada – conforme já referido - cresceu apenas 13,8% nos últimos 10 anos, a frota total de veículos cresceu 122,0% o número de acidentes em rodovias federais aumentou 77,9% e o número de mortos nessas rodovias 47,9%. Demonstra-se, assim, uma pressão crescente sobre as rodovias, tanto em volume de tráfego quanto em risco de vida para os seus usuários. (CNT, 2014)

Tabela 1 - Frota total de veículos por região – Brasil/ 2004 e 2014

Região	2004	2014	Crescimento 2004 - 2014 (%)
Brasil	37.863.432	84.063.191	122,0%
Norte	1.251.370	4.106.646	228,2%
Nordeste	4.629.926	13.669.317	195,2%
Sudeste	20.617.798	41.657.209	102,0%
Sul	8.220.556	16.880.303	105,3%
Centro-Oeste	3.143.782	7.749.716	146,5%

Fonte: (CNT, 2014)

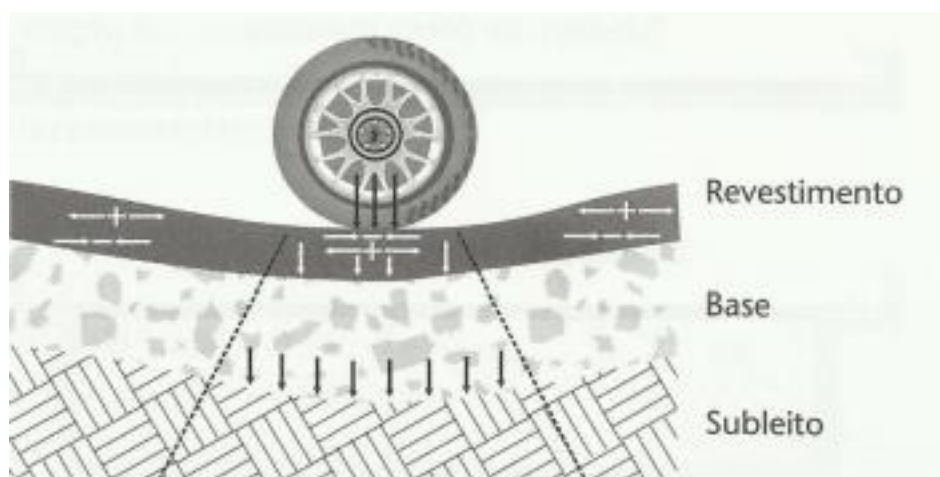
Visando prover segurança ao tráfego nas rodovias, o pavimento deve suportar os efeitos das mudanças de clima, permitir deslocamento suave, não causar desgaste excessivo dos pneus e nível alto de ruídos, ter estrutura forte, resistir ao fluxo de veículos, permitir o escoamento da água (drenagem) e ter boa resistência a derrapagens. (DNIT, 2010)

Para atender a esses requisitos, a estrutura do pavimento é particularmente importante. Ela deve ser constituída por camadas que distribuam as solicitações de carga, limitando as tensões e as deformações de maneira a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo. (BERNUCCI, 2006)

3.3 CONCEITO E ESTRUTURA DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

A estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes, embora isso não seja tomado como regra geral. Para que funcione adequadamente, todas as peças que a compõem devem trabalhar deformações compatíveis com sua natureza e capacidade, portanto, isto é, de modo que não ocorram processos de ruptura, ou danificação de forma prematura e inadvertida nos materiais que constituem as camadas do pavimento (Figura 3). (BALBO, 2007)

Figura 3 - Esforços em camadas de pavimento.



Fonte: (BALBO, 2007)

O Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construídas sobre a superfície final de terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhorias nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. (BERNUCCI, 2006)

Para o DNIT, segundo o “Manual de Pavimentação”, o pavimento de uma rodovia é superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semiespaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito (DNIT, 2006).

Tradicionalmente, os pavimentos rodoviários são classificados em rígidos e flexíveis:

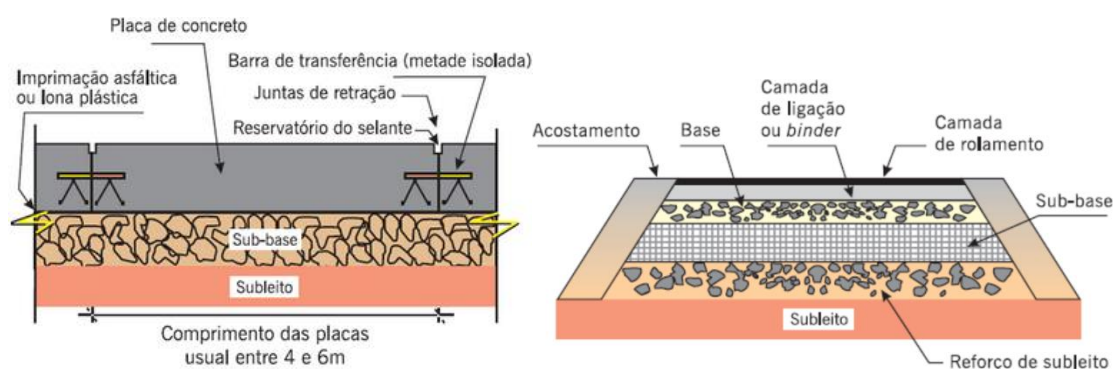
- Rígidos: são aqueles que o revestimento é uma placa de cimento Portland. Neste caso, a espessura do pavimento é definida em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes (BERNUCCI, 2006) (Figura 5).

- Flexíveis: são aqueles que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfáltico. São formados por quatro

camadas principais, sendo: o subleito, a sub-base, a base e o revestimento asfáltico (Figura 4). (BERNUCCI, 2006)

- Semirrígidos: De acordo com Souza (2004) o pavimento semirrígido é aquele caracterizado por uma base cimentada quimicamente, como por exemplo, uma camada constituída por solo-cimento e revestida por uma camada de material betuminoso. Pavimentos com revestimento asfáltico cuja base ou sub-base possui materiais cimentados e que também trabalham à tração são considerados como pavimentos semirrígidos (BERNUCCI, 2006).

Figura 4 - Estruturas dos pavimentos



Fonte: (BERNUCCI, 2006)

(a) Pavimento rígido

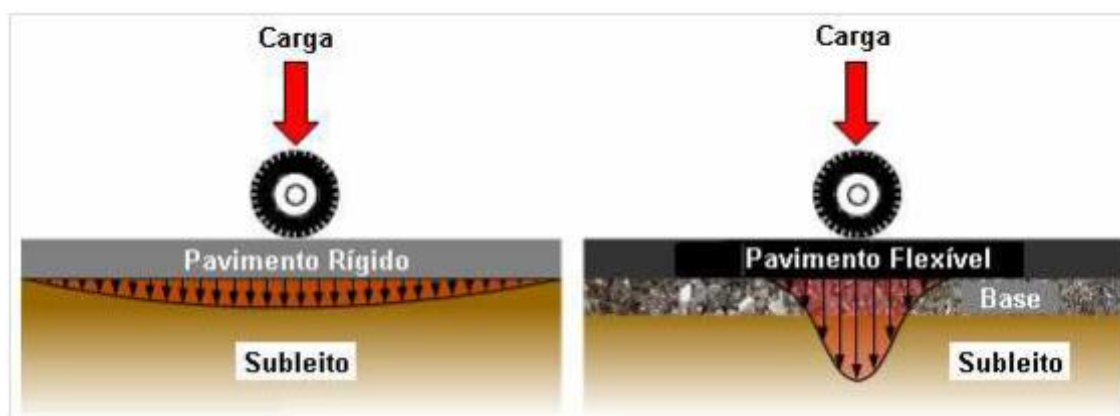
(b) Pavimento flexível

Nos pavimentos flexíveis todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento que é aplicado, de forma que a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Por sua vez, nos pavimentos rígidos, a elevada rigidez em relação às camadas inferiores absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. (DNIT, 2006)

Percebe-se então que a distribuição da carga para o subleito ocorre de forma distinta para os dois tipos de pavimentos: enquanto que para o pavimento flexível ela

se distribui para uma área menor do subleito, no pavimento rígido a distribuição ocorre em uma área relativamente maior.

Figura 5 - Distribuição de cargas nos pavimentos rígido e flexível



(UFPR. Disponível em: < <http://www.dtt.ufpr.br/pavimentacao> >. Acesso em: 26 de outubro de 2014).

Cada uma das camadas que compõem o pavimento possui uma função específica, a saber:

3.3.1 Subleito

É o terreno onde o pavimento será assentado. Deve-se estudar até a profundidade onde as tensões irão atuar, geralmente entre 1,50m e 60,00m de profundidade, já se o ISC for maior que 20% pode ser usados direto como sub-base. (MARQUES, 2007)

Quando o terreno do subleito for irregular deve-se efetuar a regularização do mesmo, devendo ser executada após o término dos trabalhos de limpeza e movimentação de terra, sendo construída sobre o subleito, cuja função é conformá-lo transversalmente e longitudinalmente, corrigindo algumas falhas da superfície de terraplenagem. (SOUZA, 2004)

3.3.2 Reforço do Subleito

O reforço do subleito pode ser definido como a camada estabilizada granulometricamente, construída sobre o subleito corretamente compactado e regularizado, utilizada quando se torna necessário diminuir as espessuras elevadas da camada de sub-base, causadas pela baixa capacidade de suporte do subleito. (DNIT, 2006)

De acordo com Marques (2007), “é uma camada de espessura constante transversalmente e variável longitudinalmente que serve para melhorar a qualidade do subleito no caso deste ter ISC menor que 2%.”.

3.3.3 Sub-base

A sub-base é a camada que complementa a base, no caso de não ser possível executar a base diretamente no subleito regularizado ou reforço. Deve ter ISC maior que 20%. (NECKEL, 2008)

Quando a espessura da base necessária para transmitir os esforços para as camadas inferiores for muito elevada, por razões construtivas e econômicas, divide-se a base em duas camadas, criando uma sub-base, que geralmente possui menor custo. (BALBO, 2007)

3.3.4 Base

As bases podem ser compostas por solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos, entre outros materiais. (BALBO, 2007)

De acordo com Marques (2007), é a camada que resiste os esforços da superfície de rolamento e distribui ao subleito, devendo ter um ISC maior que 60%.

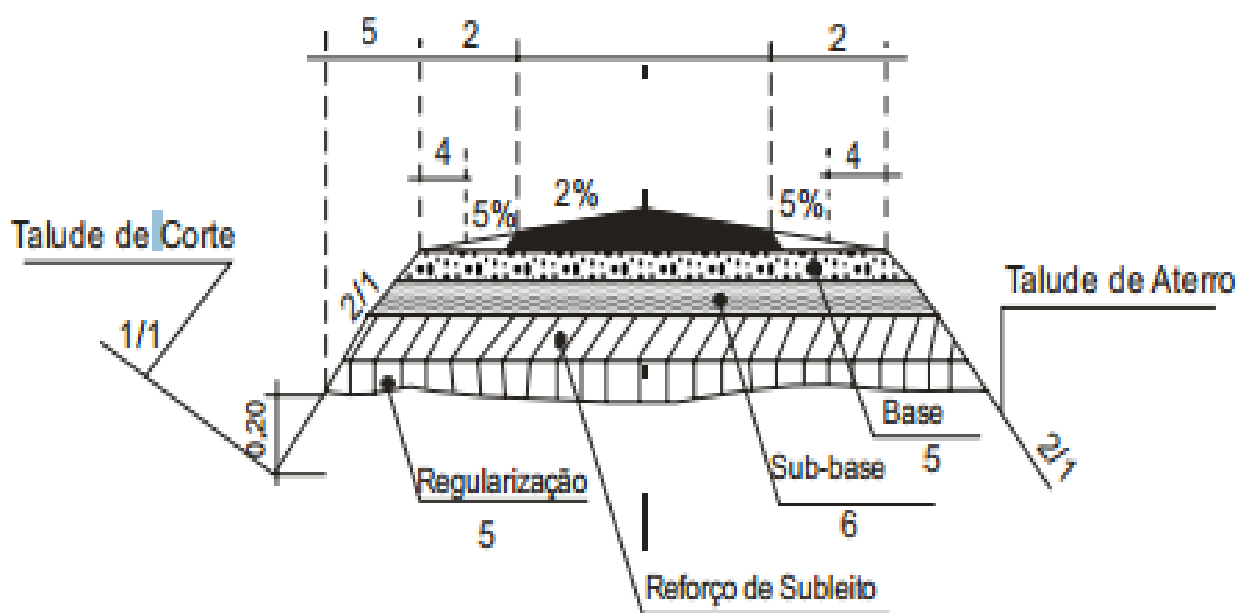
3.3.5 Revestimento

O revestimento é a camada que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, objetivando melhorar as condições do tráfego de veículos, propiciando conforto, segurança e a durabilidade do revestimento, devendo ser resistente ao desgaste. (MARQUES, 2012)

Segundo Bernucci (2010), “os revestimentos das estruturas de pavimento em geral são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão”.

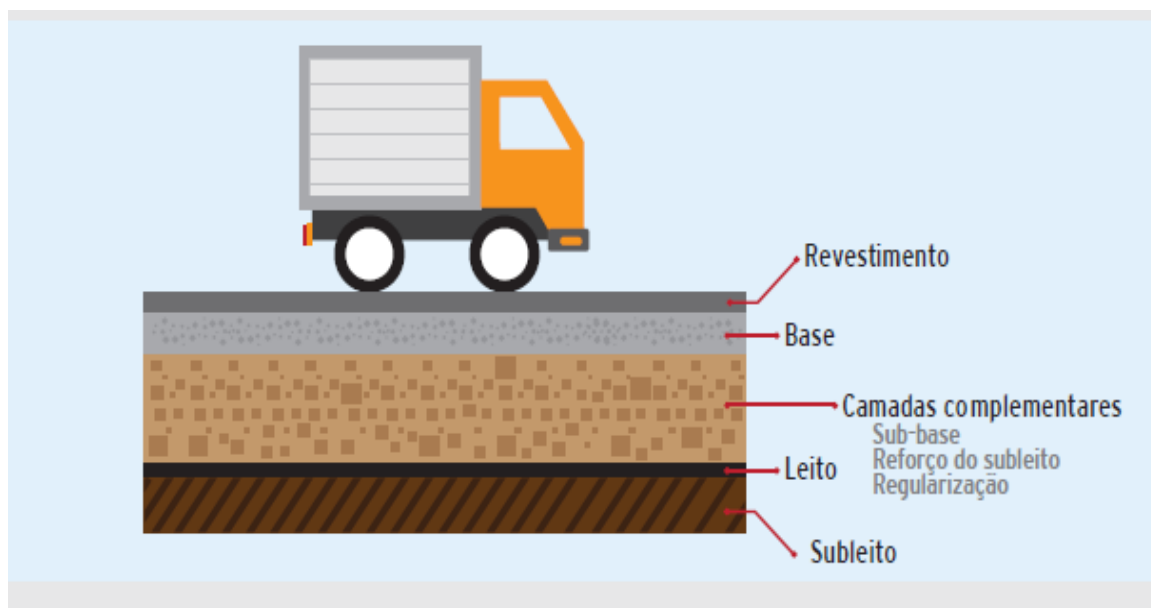
A seguir, as figuras 6 e 7 demonstram as camadas compostas pelo pavimento.

Figura 6 - Seção transversal do pavimento



Fonte (DNIT, 2006)

Figura 7 - Disposição das camadas da pavimentação



Fonte: (CNT, 2014)

3.4 SOLO-CIMENTO

3.4.1 Surgimento do solo-cimento

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (1986) o solo-cimento é o produto resultante da mistura de solo, cimento Portland e água que, compactados ao teor ótimo de umidade e sob a máxima densidade, em proporções previamente estabelecidas, adquire resistência e durabilidade através das reações de hidratação do cimento.

No Brasil o interesse surgiu a partir de 1936 com a regulamentação do seu uso pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Inicialmente o solo cimento foi utilizado na confecção de bases e sub-bases de pavimentos da estrada.

Segundo Heise (2004), as primeiras construções no Brasil com solo cimento foram o aeroporto de Petrolina (PE) e a construção de residências em Petrópolis (RJ) no início da década de 1940. Nesta mesma época o autor relata que o arquiteto Lucio Costa, utilizou o sistema construtivo de pau-a-pique e o painel monolítico de solo-

cimento em um projeto que desenvolveu para a construção da Vila Operária de João Monlevade (MG).

3.4.2 Solo com adição de cimento

O cimento está presente na composição de diversos materiais empregados na pavimentação, como: solo melhorado com cimento (SMC), solo-cimento (SC) Figura 8(a), solo-brita-cimento (SBC), brita graduada tratada com cimento (BGTC) Figura 8(b), concreto compactado a rolo (CCR), além de outros materiais reciclados. Neste trabalho será utilizado o (SC).

Figura 8 - Materiais cimentados empregados em base, sub-bases ou reforços.



Fonte: (BERNUCCI, 2006)

(a) Solo cimento

(b) Brita graduada tratada com cimento

De acordo com Bernucci, (2006), as misturas se diferenciam pela finalidade que se deseja obter e com a quantidade em massa de cimento misturada ao solo. De acordo com a norma do DNER-ES 305/1997 – Pavimentação – base de Solo-cimento, na técnica de estabilização química dos solos com o cimento Portland, para obter-se um significativo enrijecimento do solo, na mistura de solo-cimento devem ser empregados, em massa de solo, percentuais acima de 5% de cimento.

Segundo o DNER-ES 304/1997 – Pavimentação – base de solo melhorado com cimento, o solo melhorado com cimento tem as suas propriedades melhoradas

parcialmente, com destaque para a trabalhabilidade junto com um determinado aumento da capacidade de suporte, para isso empregam-se percentuais de cimento baixos, na faixa de 3%.

3.5 CIMENTO PORTLAND

3.5.1 Propriedades do cimento Portland

A NBR 5732, (1991) define como aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais Pozolânico, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos (Figura 9).

Figura 9 - Exemplo de cimento Portland



(ABCP. Disponível em: < <http://www.abpc.com.br> >. Acesso em: 26 de outubro de 2014).

O cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja

novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais (ABCP, 2002).

3.5.2 Fabricação do cimento Portland

O Processo de fabricação do cimento Portland consiste, essencialmente, em moer a matéria-prima, misturá-la apropriadamente, e queimá-las em um forno rotativo a uma temperatura de 1400°C, quando o material sofre a sinterização e funde, parcialmente, formando bolotas denominadas Clínquer. O clínquer é resfriado e finalmente moído, adiciona-se um pouco de gesso e o produto final é o cimento Portland comercial.

A mistura e a moagem da matéria-prima podem ser feitas em água ou a seco. Os métodos de fabricação, na realidade, dependem também da dureza da matéria-prima e do seu teor de umidade. (NEVILLE, 1997)

3.5.3 Composição química

Constatou-se que as matérias-primas usadas na fabricação do cimento Portland se constituem, principalmente, de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Essas substâncias reagem entre si no forno, dando origem a uma série de produtos mais complexos, e é alcançado um estado de equilíbrio químico.

No entanto, o equilíbrio não se mantém durante o resfriamento, e a velocidade de resfriamento irá afetar o grau de cristalização e a quantidade de material amorfo presente no clínquer resfriado. (NEVILLE, 1997)

Os quatro compostos considerados os principais componentes do cimento seguem abaixo na Tabela 2, juntamente com os seus símbolos abreviados:

Tabela 2 - Principais compostos do cimento Portland.

Composto	Constituição	Símbolo
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: (NEVILLE, 1997)

3.5.4 Tipos de cimentos Portland

Segundo a ABCP, (2002), existem no Brasil vários tipos de cimento Portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição (Tabela 3). Os principais tipos oferecidos no mercado, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil são:

- Cimento Portland comum;
- Cimento Portland composto;
- Cimento Portland de alto-forno;
- Cimento Portland pozolânico.

Segundo Metha, (1999, apud Segre), o cimento Portland comum é composto basicamente de clínquer e utilizado quando não são requeridas as propriedades especiais especificadas para qualquer um dos outros tipos. O cimento Portland composto foi desenvolvido visando um custo mais baixo e economia de energia.

Tabela 3 - Composição dos cimentos Portland comuns e compostos.

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória Granulada de alto-forno (sigla E)	Material Pozolânico (sigla Z)	Material Carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-			NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5735
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

Fonte: (ABCP, 2002).

3.6 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

A estabilização de solos é um método que concede ao mesmo, maior resistência às cargas, ao desgaste ou à erosão, através da compactação, correção de sua granulometria e plasticidade ou pela adição de substâncias que lhe atribuem coesão, resultante da cimentação ou aglutinação dos seus grãos (SOUZA, 2013).

Segundo Souza (2013), a estabilização de solos é um tratamento aplicado ao solo, para alterar características do solo natural que são indesejáveis para execução de determinadas obras de engenharia. Pode ocorrer por um processo mecânico ou químico.

- Mecânico: compactação realizada por meio da aplicação de uma energia de compressão no solo em camadas, com controle de umidade; o controle tecnológico ocorre por meio de ensaios;

- Químico: acréscimo de um agente químico que produz uma ação cimentante, modificando as propriedades físicas dos grãos do solo, reunidos através do emprego da cal, cimento ou subprodutos da indústria.

Em geral, a estabilização de solos é uma técnica muito empregada em pavimentação, podendo ser utilizados neste tipo de obra materiais como o cimento, a cal e a emulsão asfáltica (ROSA, FERREIRA e GUIMARÃES, 2006).

3.6.1 A estabilização do solo com cimento

A estabilização química de solos com cimento Portland pode se dar de duas formas distintas a depender do objetivo:

- (i) No caso de objetivar-se um enrijecimento significativo do solo, empregam-se percentuais em massa em geral acima de 5% e denomina-se esta mistura de solo-cimento (DNER-ES 305 – DNER, 1997f);
- (ii) No caso de melhoria parcial das propriedades, principalmente trabalhabilidade conjugada com certo aumento de capacidade de suporte, empregam-se percentuais baixos, da ordem de 3%, denominando-se neste caso a mistura de solo melhorado com cimento. (DNER-ES 304 – DNER, 1997e)

O solo, para ser estabilizado com cimento de forma econômica, deve ter certa proporção de areia, pois caso tenha um percentual muito alto de argila pode exigir um teor muito elevado de cimento e ficar demasiadamente oneroso, além de apresentar muita retração. A faixa viável é de aproximadamente 5 a 9% de cimento em relação à massa total. (BERNUCCI, 2006).

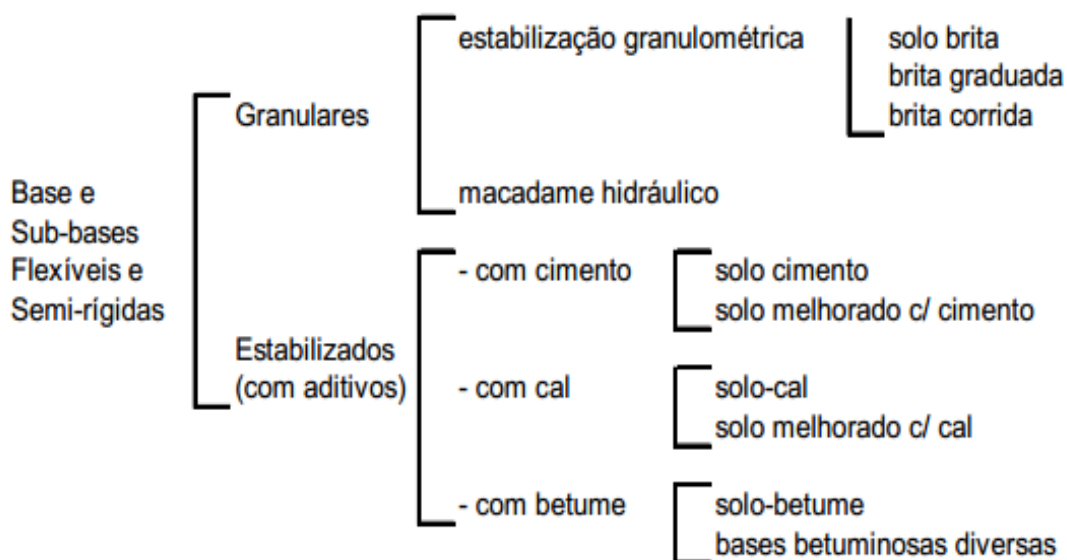
Ainda segundo Bernucci, (2006), o solo-cimento deve ser feito de preferência em usina, mas também pode ser misturado em pista, no caso de vias de baixo volume de tráfego. Deve ser compactado imediatamente após a mistura e a distribuição em

pista devido à rapidez da reação de hidratação do cimento. A base de solo-cimento tem-se mostrado bastante resistente e durável desde que a mistura esteja bem dosada, sejam respeitados os prazos máximos de mistura, espalhamento e compactação, seja minimizada a ocorrência excessiva de trincas por retração, e o subleito tenha boa capacidade de suporte para que o solo-cimento seja compactado de forma eficiente. O tráfego deve ser liberado em geral após 14 dias de cura. O solo-cimento também tem sido utilizado com sucesso como sub-base de pavimentos de concreto de cimento Portland.

3.7 MATERIAIS UTILIZADOS NA PAVIMENTAÇÃO E NORMATIZAÇÃO

Os materiais a serem utilizados nas bases, sub-bases e reforço do subleito, dependem do tipo de camada a ser executada. A classificação indicada na figura 10, a seguir, é fornecida pelo manual de pavimentação do DNIT:

Figura 10 - Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas.



Fonte: (DNIT, 2006).

Os materiais granulares são aqueles que não possuem coesão e que não resistem à tração, trabalhando eminentemente aos esforços de compressão. Os solos coesivos resistem principalmente à compressão, e também à tração de pequena magnitude. Os materiais cimentados são materiais granulares ou solos que recebem adição de cimento, cal ou outro aditivo, de forma a proporcionar um acréscimo significativo de rigidez do material natural e um aumento da resistência à compressão e à tração (BERNUCCI, 2006).

Para a classe da estabilização granulométrica, além dos materiais mais tradicionais como, a brita graduada simples, a brita corrida e solo brita, deve-se ressaltar ainda a existência de outros materiais de uso crescente em pavimentação, decorrentes da reutilização e reciclagem: escória de alto-forno; agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil e demolições; rejeitos de extração de rochas ornamentais; mistura asfáltica fresada etc. (BERNUCCI et al., 2006).

Para as bases de pavimentos, as especificações tradicionais preconizam o uso de materiais onde o grão-grão seja garantido. Procura-se também que fique caracterizada uma distribuição granulométrica bem graduada, com preenchimento dos vazios. Esses materiais são também conhecidos por misturas estabilizadas granulometricamente. (BERNUCCI, 2006).

Os materiais para base granular devem se enquadrar numa das faixas granulométricas (Tabela 4):

Tabela 4 - Granulometria para base granular.

Tipos	Para $N > 5 \times 10^5$			Para $N < 5 \times 10^5$			Tolerâncias da faixa de projeto
Peneiras	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: (ABNT, 2004).

Além do enquadramento nas faixas granulométricas, a ABNT NBR 11804 fixa as condições exigíveis de camadas de sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente. Os materiais devem atender também:

Durabilidade: quando ensaiados de acordo com a ASTM C 88, em cinco ciclos, os materiais devem apresentar, em massa, perdas menores que 20% no sulfato de sódio e menores que 30% no sulfato de magnésio;

Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP): as partículas de materiais com diâmetro dos grãos inferior a 0,42 mm, quando ensaiadas de acordo com a MB-30 e MB-31, devem apresentar limite de liquidez inferior a 25% e índice de plasticidade inferior a 6%;

- Abrasão: quando ensaiados de acordo com a MB-170, os materiais devem apresentar uma perda por abrasão Los Angeles inferior a 5%;
- Índice de Suporte Califórnia (ISC): quando ensaiados de acordo com a MB-2545, os materiais devem apresentar:
- Para sub-base: ISC igual ou superior a 20% e expansão inferior ou igual a 1%;
- Para base: ISC igual ou superior a 60% para um número "N" inferior ou igual a 5×10^6 e expansão inferior ou igual a 0,5%.

Vale salientar ainda que caso o LL seja maior do que 25% e/ou IP maior que 6%, o material pode ser empregado na construção da camada de base (satisfeitas às demais condições) desde que o equivalente de areia > 20%.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA DE TRABALHO

Neste tópico, será apresentado o modo utilizado para determinar a localização, procedimentos, características e propriedades do solo analisado para estudo em laboratório. Este trabalho é uma continuação do trabalho realizado por Souza (2013), onde ele abordou parâmetros de dois tipos de solos característicos do Distrito Federal estabilizados com cal. A figura 11 apresenta de forma geral a metodologia.

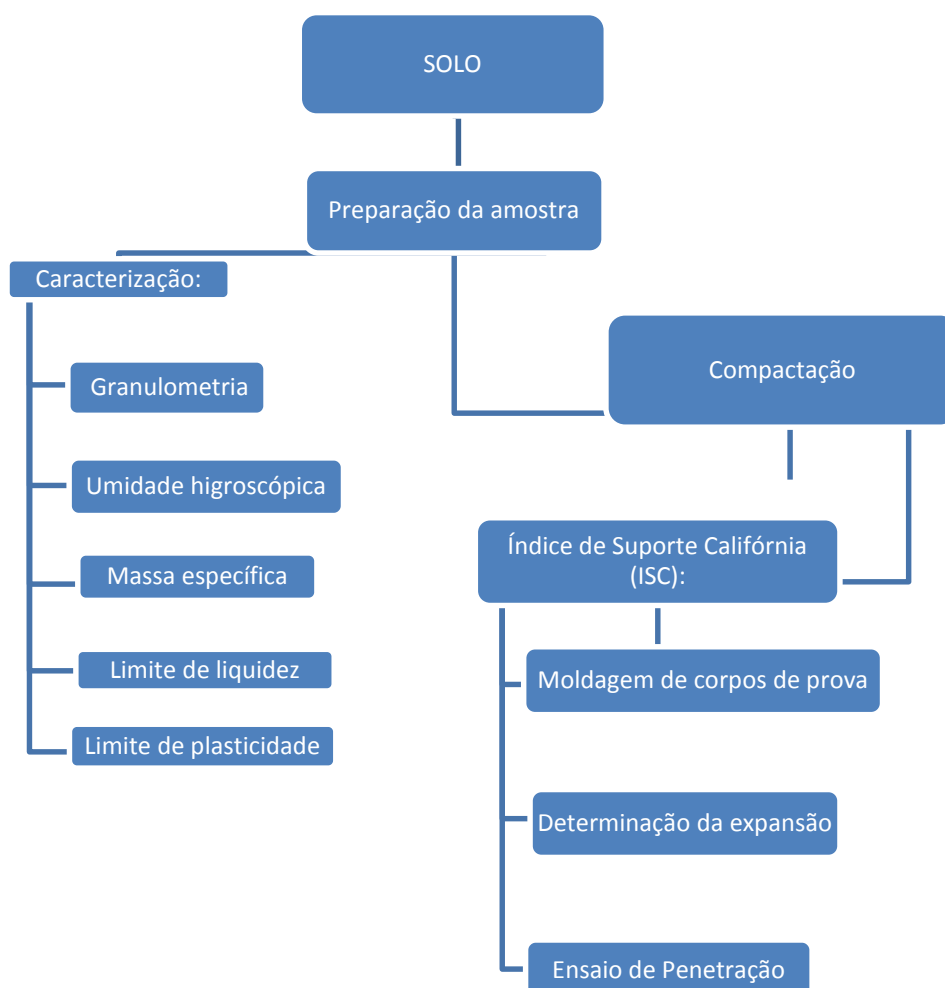


Figura 11 - Representação da metodologia utilizada

4.1 LOCALIZAÇÃO E ORIGEM DOS MATERIAIS.

4.1.1 Solo

No Distrito Federal encontra-se na quase totalidade recoberta por uma camada de solo poroso colapsível. A espessura dessa camada e a posição do lençol freático são bastante variadas. (CAMAPUM, 1994)

A amostra de solo foi retirada próximo à delegacia da criança e do adolescente localizada na EQN 204/205 Asa Norte (Figura 12). Na coleta do material, foi adotado o cuidado de recolher uma quantidade representativa do solo a ser analisado. Adotou-se também, o cuidado de excluir do material recolhido, toda e qualquer matéria

estranha à amostra de solo. Utilizaram-se ferramentas comuns, como pás e enxadas, para retirada do solo.

Figura 12 - Localização do ponto de coleta das amostras



(Disponível em: < <http://www.google.com.br> >. Acesso em 16 de outubro de 2014)

4.1.2 Cimento

O tipo de cimento utilizado no ensaio foi o CP-II E 32. Porém, não foi submetido a nenhum tipo de ensaio. Este cimento é propriamente utilizado na construção civil. A tabela 5 apresenta as características químicas estabelecidas por Mundim, (1990). Logo abaixo, a figura 13 demonstra o cimento em si utilizado nos ensaios.

Tabela 5 - Componentes químicos do cimento

Componentes	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO livre	SO ₃
Porcentagem	64.34	3.11	19.38	4.94	3.22	2.61	1.83

Fonte: (MUNDIM, 1990)

Figura 13 - Cimento CP II E 32



Fonte: (VOTORANTIM Disponível em: < <http://www.votorantim.com.br> >. Acesso em 15 de outubro de 2014).

4.1.3 Água

Neste ensaio utilizou-se água da rede de abastecimento.

4.2 METODOLOGIA

Todos os ensaios basearam-se de acordo com a norma da ABNT. Têm-se os métodos aplicados na realização dos ensaios de laboratório.

Coleta e Preparação da Amostra –

Após a coleta, o material foi levado ao laboratório para que fosse feita a secagem prévia. Esta secagem consta em deixar a amostra ao ar livre até próximo da umidade higroscópica

Desmancharam-se os torrões para que o solo ficasse homogêneo (Figura 14), separando em recipientes com as quantidades suficientes para a realização dos ensaios. Em seguida, foi tomada uma fração da amostra para passagem na peneira 4.8 mm (Figura 17) segundo a norma 6457 (ABNT, 1986).

Figura 14 - Processo de destorroamento



Figura 15 - Passagem da amostra destorroada na peneira nº4 (4.8mm)



Assim, foram limitados os tamanhos máximos das partículas a serem analisadas posteriormente no ensaio de caracterização e compactação.

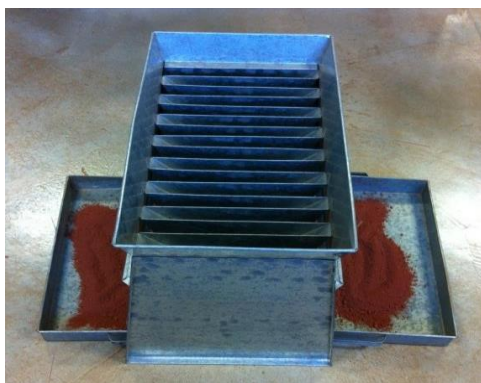
4.2.1 Análise granulométrica do solo

O ensaio de granulometria está previsto na NBR 7181/84 que descreve o método para a análise granulométrica de solo, sendo realizada por uma combinação de sedimentação e peneiramento.

O objetivo deste ensaio é determinar a porcentagem em peso que cada faixa de tamanho de partículas representa na massa total ensaiado. Com este ensaio, é possível determinar a curva granulométrica utilizada como parâmetros para bases estabilizadas.

Antes de inicializar o ensaio, fez-se o quarteamento do material (Figura 16) e a devida secagem ao ar. Então, pesou-se 1500 gramas do solo, tomando-se o cuidado de destorroar os torrões existentes; passou-se toda a massa na peneira #10 (2,0mm); e por fim, do material que passou, foram separadas 70 g para a sedimentação e o peneiramento fino.

Figura 16 - Quarteamento do material



Após a preparação inicial, foram adotados os procedimentos experimentais:

(A) Peneiramento grosso (material retido na peneira #10)

- Lavou-se o material na peneira #10 (2,0 mm), em seguida colocou-se na estufa;
- Peneirou-se o material seco até a peneira #10, pesando-se as frações retidas em cada peneira (Figura 17 e 18).

Figura 17 - Peneiras para granulometria grossa

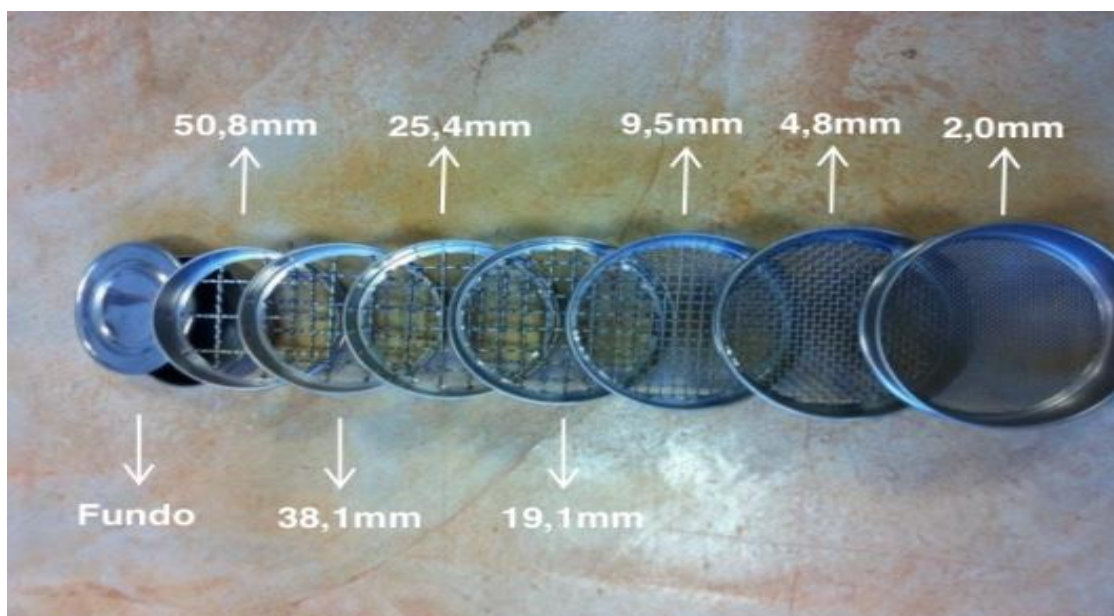


Figura 18 - Execução do peneiramento grosso



(B) Peneiramento fino (material que passa na peneira #10)

- Lavou-se o material na peneira #200 (1,0175 mm), em seguida colocou-se na estufa;
- Peneirou-se o material seco nas peneiras de aberturas inferiores a de #10 (Figura 19), pesando-se em seguida.

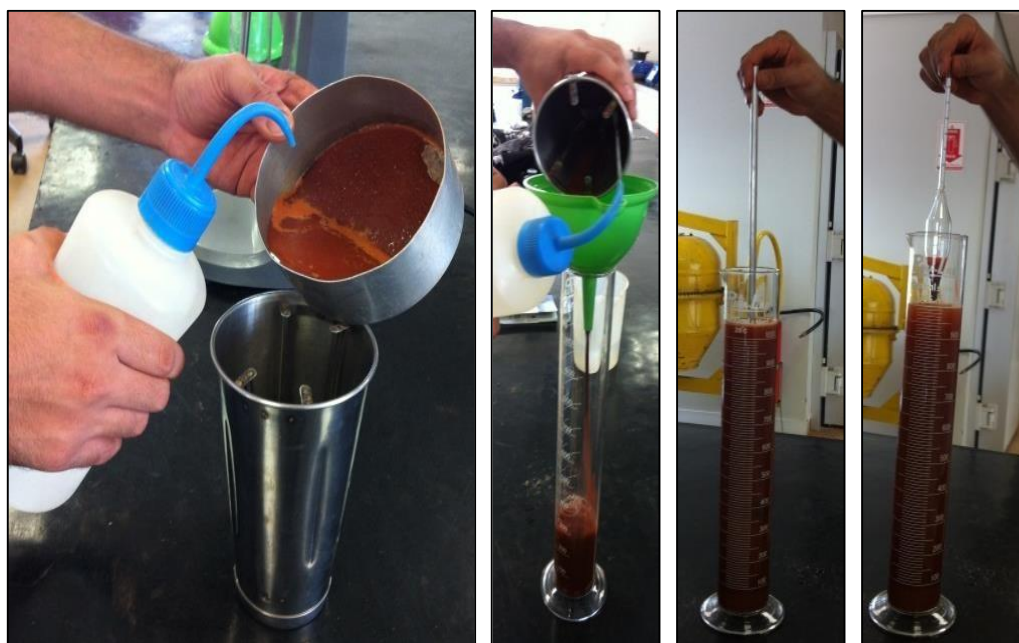
Figura 19 - Execução do peneiramento fino



(C) Sedimentação

- Colocou-se a massa de 70 g em repouso na água com defloculante (material que serve para separar as partículas do solo, vencendo suas forças elétricas de atração).
- Utilizou-se o dispersor elétrico para agitar a mistura por 15 minutos, posteriormente, a mistura foi transferida para uma proveta graduada. Completou-se a proveta com água destilada até chegar a marca de 1000 ml para que em seguida fosse realizado o balanceamento;
- Foram feitas as leituras do densímetro nos instantes de 30s, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos e 1, 2, 4, 8 e 24 horas.

Figura 20 – Processo de sedimentação do material em análise



Fonte: (SOUZA, 2013)

Os materiais utilizados neste ensaio foram: balança de precisão, almofariz, mão de grau, cápsulas para determinação da umidade, estufa capaz de manter as temperaturas entre 105° e 110° C, jogo de peneiras de 0,074 a 50,8 mm, agitador de

peneiras, dispersor elétrico, proveta graduada de 1000 ml, densímetro graduado de bulbo simétrico, termômetro e cronômetro.

(D) Umidade higroscópica

Para determinação da umidade higroscópica foi realizada a média aritmética de três amostras do material que passou na peneira #10. Este material foi pesado antes e depois de ficar por 12 horas na estufa para secagem total das amostras.

Figura 21 - Umidade higroscópica

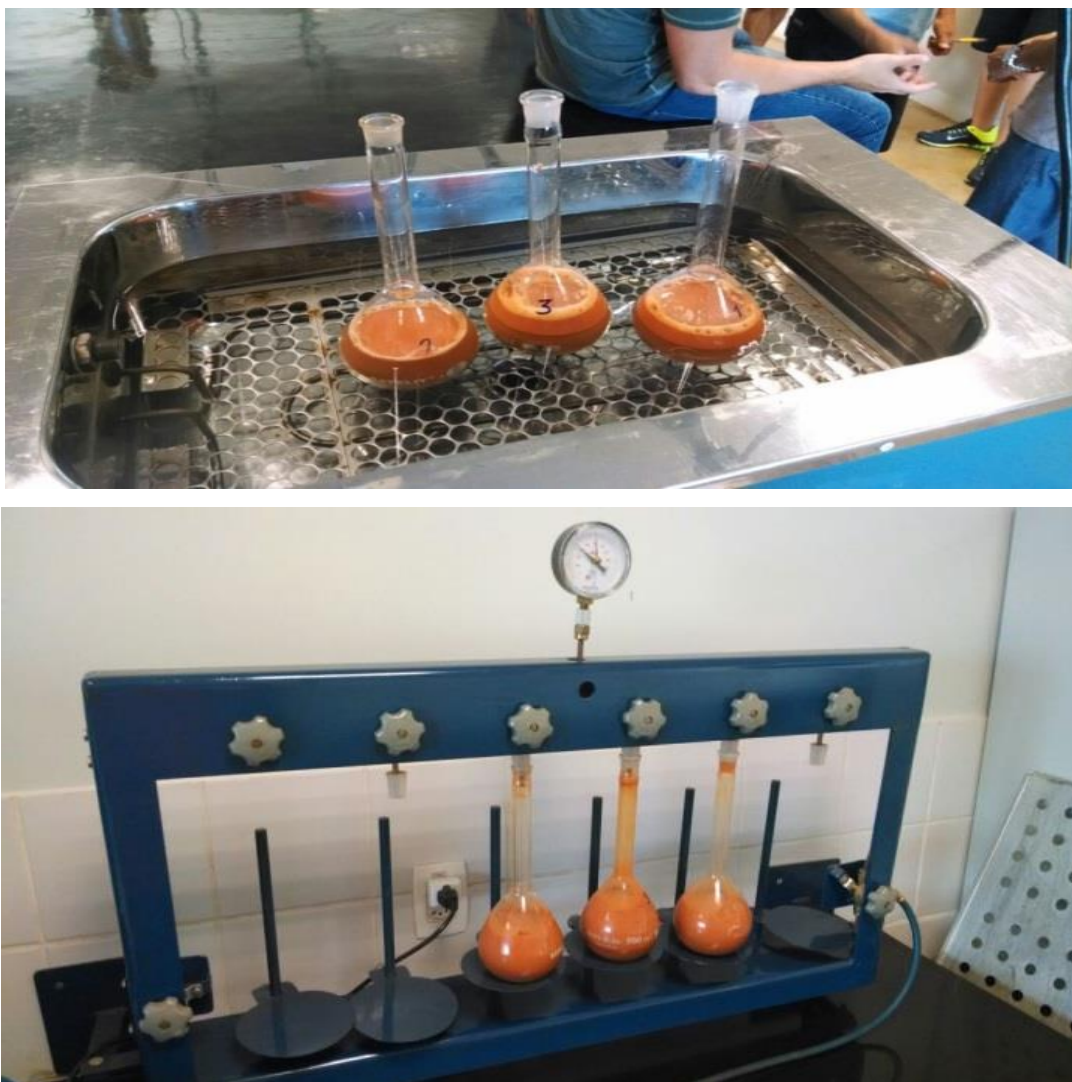


(E) Determinação da massa específica

Finalizou-se esta fase do ensaio com referência a NBR 6508/84 que descreve os meios de determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm, por meio de picnômetros (Figura 22). Inicialmente, colocou-se 60 g de amostra em três capsulas com água destilada em quantidade suficiente para completa imersão do material por 12 horas. Em seguida, foram colocadas em picnômetros. Para a retirada total do ar, os picnômetros foram submersos por aproximadamente 30 minutos. Logo após, os picnômetros permaneceram em repouso até que a temperatura se igualasse a ambiente. Finalmente, foram feitas as

leituras de temperatura e peso dos picnômetros com adição de água e solo, sendo possível realizar o cálculo da massa específica dos grãos.

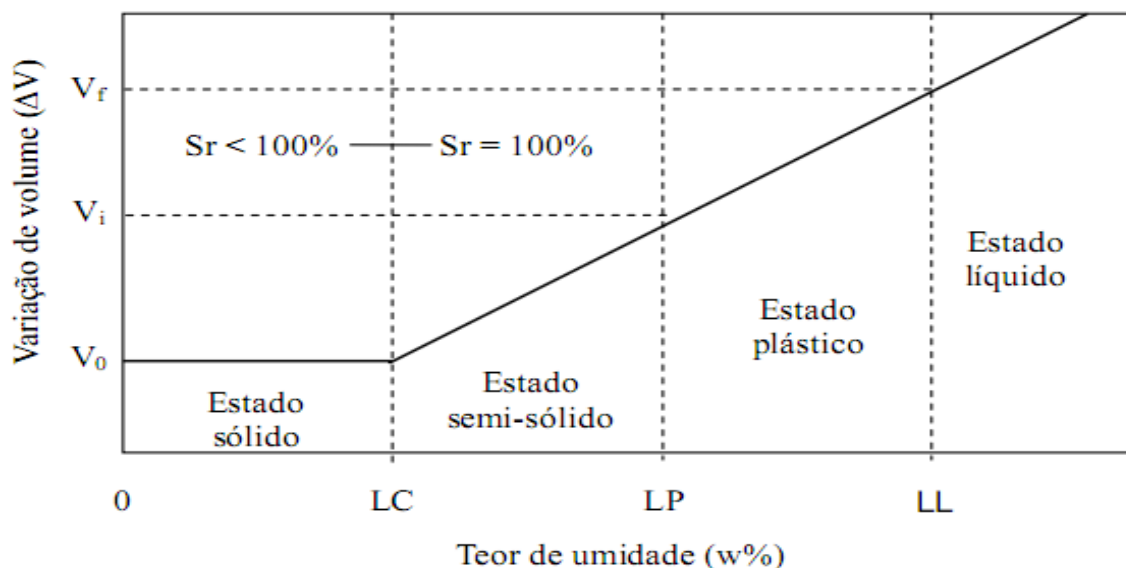
Figura 22 - Procedimento de determinação da massa específica do solo



Quando a umidade do solo é muito grande, diz-se que o solo se encontra no estado líquido, à medida com que a água se evapora, o solo enrijece, passando do estado líquido para o plástico. O limite de liquidez e plasticidade permite avaliar a capacidade de modelagem do solo sem variação de volume, sob certas condições de umidade. Sendo o limite entre o estado líquido e plástico é denominado limite de liquidez. Ao continuar a perda de umidade, o solo passa para o estado semissólido. A

umidade correspondente ao limite entre os estados plásticos e semi plásticos e semissólidos é denominado limite de plasticidade. Continuando a secagem, ocorre a passagem para o estado sólido, e o limite entre estes dois últimos estados é denominado limite de contração. (DNIT, 2006)

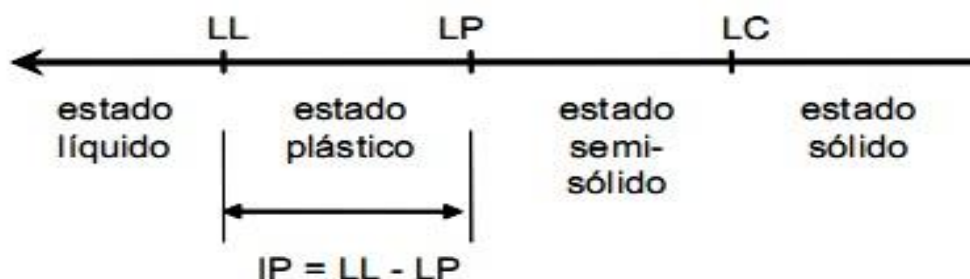
Figura 23 - Representação dos estados e dos limites



Fonte: (UFMG <<http://etg.ufmg.br>> Acesso em: 22 de Outubro de 2014)

Outro parâmetro definido por estes ensaios é o limite de plasticidade (IP), este que, corresponde à diferença numérica entre os limites de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP), definindo o caráter de plasticidade de um solo.

Figura 24 - Índice de plasticidade



Fonte: (DNIT, 2006)

O índice define o intervalo em que o terreno se encontra no estado plástico. Quanto maior o IP, mais plástico será o solo para as argilas. Quando o solo não tem plasticidade, como a areia, por exemplo, escreve NP (não plástico), segundo o DNIT.

Para dar início aos ensaios foram separados parte da amostra de solo que passou na peneira # 40 (0,42 mm). As amostras foram preparadas de acordo com a NBR 6459 (limite de liquidez) e NBR 4180 (limite de plasticidade).

(F) Limite de liquidez

- Colocou-se parte da amostra em um recipiente de porcelana e aos poucos se adicionou água para homogeneização da massa;
- Em seguida, parte do material foi inserida na concha do aparelho de Casagrande (Figura 25), aplainando-a com a espátula, de tal forma que a parte central ficasse com um centímetro de espessura;

Figura 25 - Aparelho Casagrande



Fonte: (SOUZA, 2013)

- Com apoio de um cinzel, realizou-se uma ranhura no meio da massa, no sentido do maior comprimento do aparelho;
 - Girou-se então a manivela à razão de duas voltas por segundo, contando o numero de golpes até que se constatou fechamento da ranhura num comprimento de 1,2 cm (momento em que se paralisou o procedimento);
 - Retirou-se uma pequena quantidade do material no local onde as bordas da ranhura se tocaram para possível determinação da umidade;
- Este processo foi repetido por mais quatro vezes.

Figura 26 - Determinação do limite de liquidez (ABNT NBR 6459/82)



Fonte: (SOUZA, 2013)

(G) Limite de plasticidade

- Colocou-se parte da amostra em um recipiente de porcelana e aos poucos foi adicionando água para a homogeneização do material;

- Em seguida, tomou-se aproximadamente 10 g de amostra formando uma pequena bola, esta bola foi rolada sobre a placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para que lhe desse a forma de cilindro (Figura 27). Este procedimento foi feito até que se fissurasse em pequenos fragmentos.

Assim, quando a massa atingiu três mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, coletaram-se alguns fragmentos fissurados para a determinação da umidade;

Este procedimento foi repetido por mais quatro vezes.

Figura 27 - Fases do ensaio do limite de plasticidade (ABNT NBR 180/84)



(H) Índice de plasticidade

Para a determinação do índice de plasticidade (IP), subtraiu-se o valor percentual do limite de liquidez (LL) pelo valor percentual do limite de plasticidade (LP), conforme a equação a seguir:

$$IP = LL - LP$$

Fonte: (ABNT NBR 180/84)

Os materiais utilizados para estes ensaios foram: peneira #40, espátula, garrafa plástica com água destilada, recipiente de porcelana, aparelho de Casagrande, cinzéis, placa de vidro esmerilhada, cápsulas para a determinação de umidade, balança de precisão e estufa.

4.2.2 Ensaio de compactação

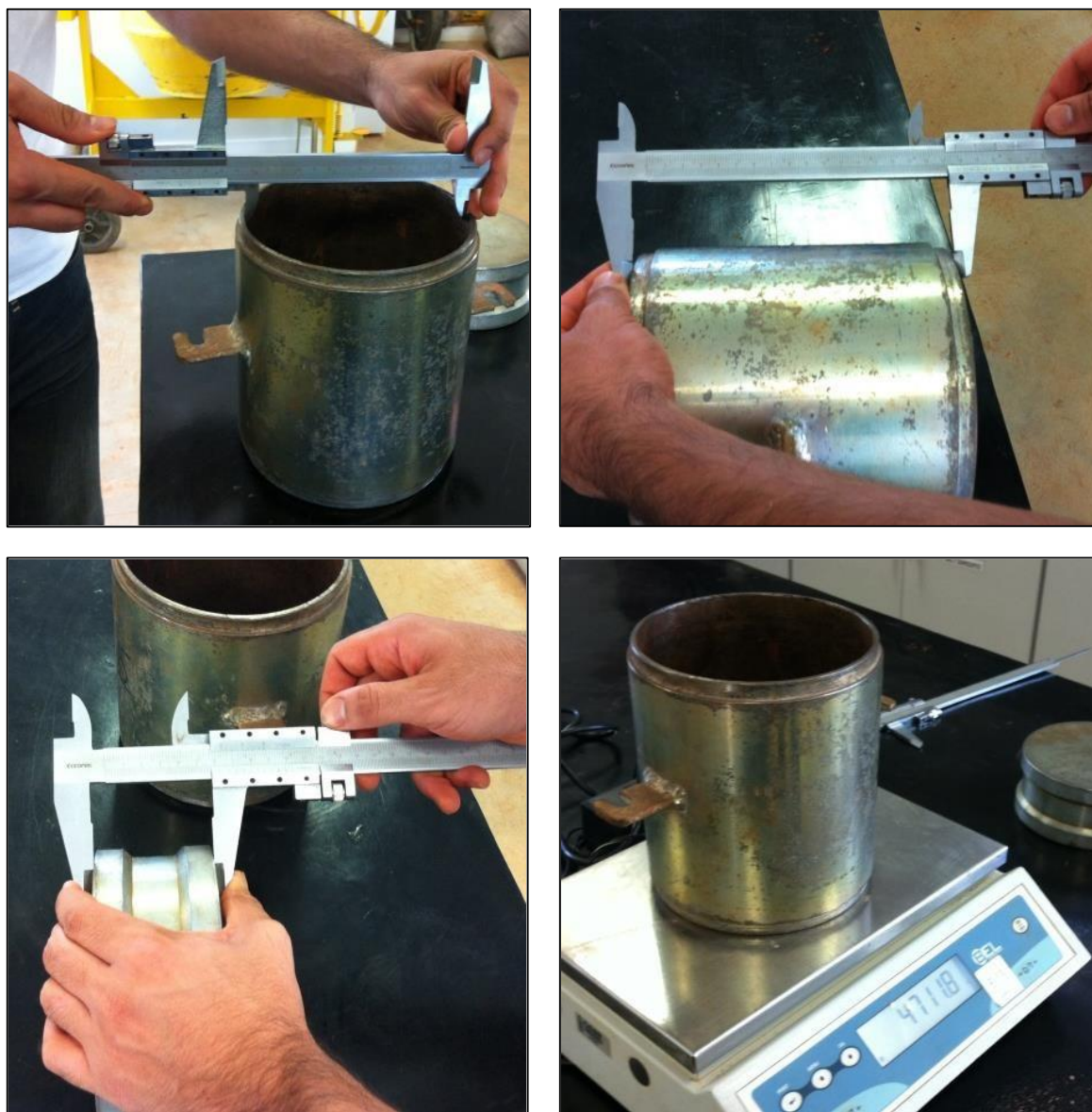
Com o objetivo de analisar neste trabalho, a viabilidade do uso de solo-cimento na base da pavimentação, adotaram-se teores de cimento que ainda não haviam sido empregados nas pesquisas desenvolvidas no Laboratório de geotécnico do UniCeub, ou seja, 6, 8 e 10% de cimento em relação a pesagem da amostra de solo seco.

O ensaio de compactação é definido pela NBR 7182/86, que consta em determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo. Com este ensaio, foi possível encontrar a umidade ótima e a massa específica seca máxima para que, posteriormente, fosse utilizada na realização do ensaio de Índice Suporte Califórnia (ISC).

Concluído o processo de preparação do solo, foi iniciada a execução do ensaio de compactação do solo em análise:

- Para iniciar a compactação do material foram pesados e medidos os diâmetros e as alturas de todos os cilindros (Figura 28).

Figura 28 - Medidas dos cilindros



Fonte: (SOUZA, 2013)

- Calcula-se o peso de cimento (Figura 29) a ser utilizado e a quantidade de água (Figura 30) a ser acrescentada para obtenção do solo-cimento, ambos devidamente pesados em uma balança de precisão.

Figura 29 - Pesagem do cimento na balança de precisão



Figura 30 - Pesagem da água para homogeneização da mistura



- A preparação de solo-cimento foi realizada misturando-se o solo areno siltoso juntamente com o cimento (Figura 31) na proporção determinada até se obter uma amostra de mesma coloração dentro da bandeja.

Figura 31 - Mistura de solo com cimento para compactação



- Pesou-se e acrescentou-se água lentamente e uniformemente até ocorrer à homogeneização da amostra. Ao atingir a trabalhabilidade desejada e especificada foi realizada a compactação do corpo de prova.
- De acordo com a norma técnica brasileira, fixou-se o molde cilíndrico à base, acoplando o cilindro complementar e apoiando o conjunto em uma base rígida (Figura 32).

Figura 32 - Molde cilíndrico



- Colocou-se uma folha de papel-filtro com diâmetro igual ao molde utilizado, de modo a evitar a aderência do solo compactado à superfície metálica da base.
- Desta forma, compactou-se a primeira camada com um soquete metálico de aproximadamente 30 centímetros de queda (Figura 33). Teve-se o cuidado de escarificar levemente os topos acabados entre as cinco camadas necessárias na moldagem do corpo de prova, foi utilizado 55 golpes em cada camada. Este procedimento fez com que aumentasse a integração e consequentemente a aderência entre as camadas superpostas.

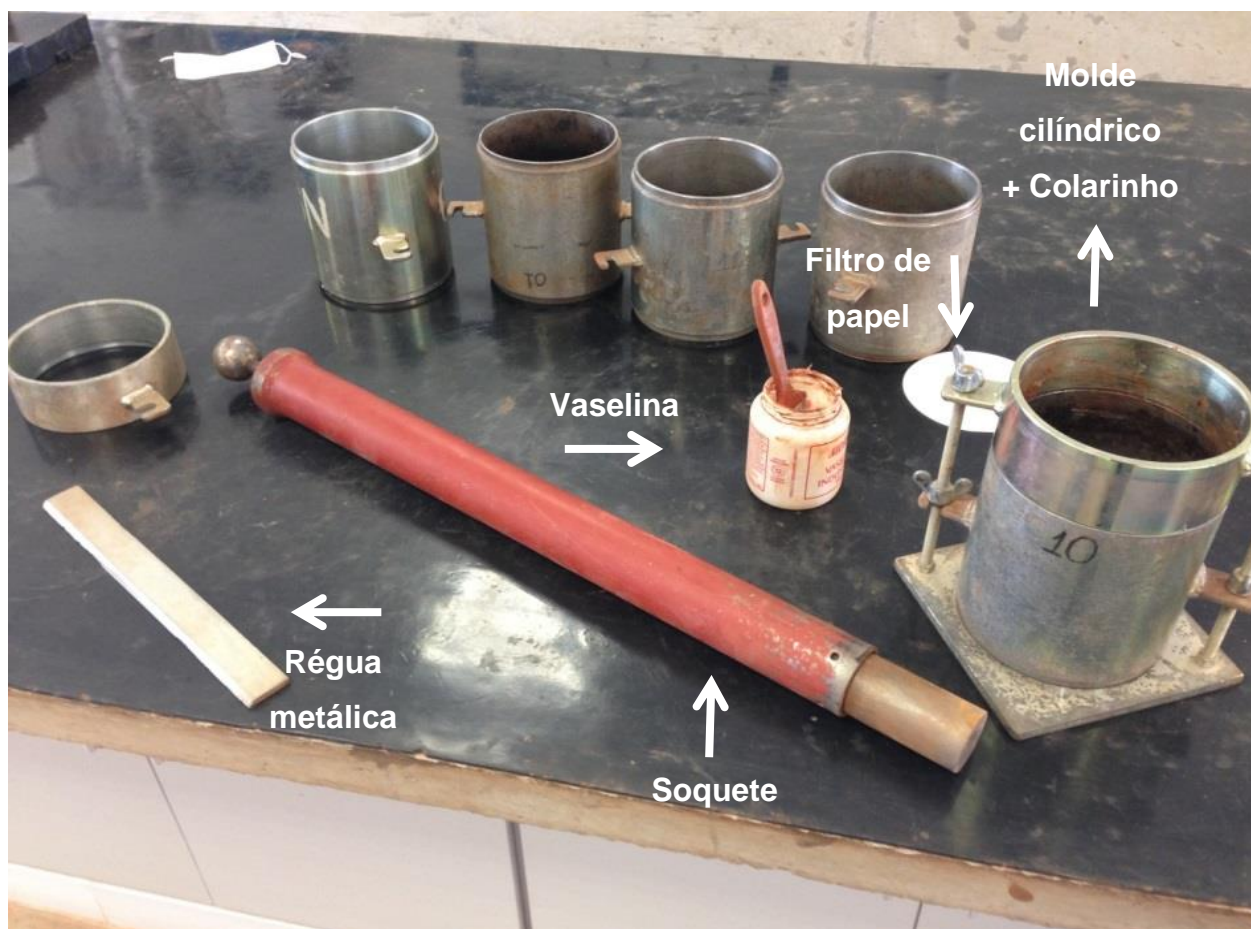
Figura 33 - Processo de compactação com utilização do soquete



- Terminada a compactação na quinta camada, retirou-se o colarinho e rasou-se topo do corpo de prova, de maneira a obter uma superfície horizontal lisa e nivelada com a borda superior do molde, levando em consideração que o material não pudesse ultrapassar a altura de 10 mm além do molde cilíndrico. Do arrastamento do material acima do limite do cilindro, foram recolhidas três amostras para obtenção da umidade de compactação.

Os materiais utilizados neste ensaio foram: cilindro metálico grande, soquete metálico, papel filtro, vaselina, recipiente plástico, espátula, bandeja metálica, régua e balança de precisão (Figura 34).

Figura 34 - Moldes cilíndricos, régua metálica, filtro de papel e soquete utilizados no processo de compactação.



4.2.3 Índice de suporte Califórnia e expansão

(A) Moldagem dos corpos de prova

Na determinação do índice de suporte Califórnia e de expansão foi realizada de acordo com a NBR 9895/87. Este ensaio consiste em determinar a capacidade de suporte de um solo compactado.

Com base nos ensaios de compactação, foi possível moldar os corpos de prova cilíndricos na massa específica seca máxima e umidade ótima. Foram

compactados quatro cilindros, sendo um para amostra natural e os outros três para mistura de solo cimento.

Determinou-se o teor de umidade em que as misturas se encontravam antes do início da compactação. Em seguida, adicionou-se água para que as misturas atingissem a umidade ótima.

A execução da compactação deu-se da mesma forma que o ensaio anterior.

Figura 35 - Material separado para compactação na umidade ótima



Figura 36 - Cilindro compactado na umidade ótima



(B) Determinação da expansão

Ao finalizar a compactação, foram fixadas bases circulares nos cilindros contendo as amostras compactadas, deixando-se o espaço onde se encontrava o disco espaçador na parte superior. Todos os cilindros foram imersos em água por quatro dias, com um extensômetro devidamente instalado na parte superior dos cilindros. Durante os quatro dias foram realizados as leituras de expansão a cada 24 horas.

Figura 37 - Cilindros imersos em água para leitura da expansão



(C) Ensaio de penetração

Depois de realizadas todas as leituras de expansão, os anéis superiores dos cilindros foram reinstalados. Sequentemente, os conjuntos foram levados até a prensa onde houve a tentativa de subtração da amostra compactada do cilindro. Este processo foi feito com a ajuda de um pistão a uma velocidade constante, conforme a NBR 9895/87. Para cada momento (definido pela norma) foram realizadas as leituras

de deformação do anel. Entretanto, só foi possível retirar do cilindro a amostra de solo natural (sem a mistura solo cimento). Pois, houve um enrijecimento da mistura solo cimento impossibilitando a retirada do mesmo pela prensa (Figura 38).

Figura 38 – Tentativa de retirada da amostra do cilindro metálico por meio da prensa.



(D) Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples é o parâmetro mais utilizado na obtenção das características das misturas de solo-cimento. Neste ensaio foi utilizado o procedimento descrito na norma NBR MB 3361/90 – Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos.

Desta forma, todo ao procedimento de compactação foi repetido para as umidades ótimas, porém, desta vez as amostras após a compactação, foram desmoldadas (Figura 39) e submetidas a um período de cura de quatro dias,

armazenando-as em câmara úmida, expondo-se a mistura de solo compactado a um umidificador por quatro dias (Figura 40).

Figura 39 - Desmolde das amostras compactadas (a) pistão para desmoldagem e (b) amostra retirada do cilindro



(a)



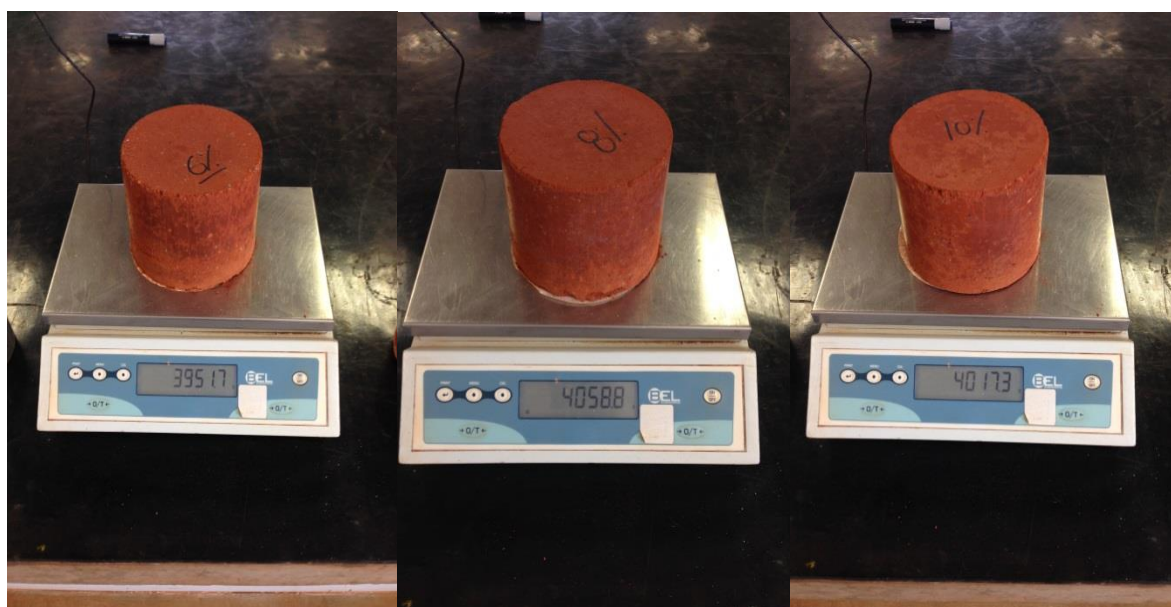
(b)

Em seguida, as amostras foram devidamente pesadas (figura 41), e levadas a uma prensa de compressão simples (Figura 42).

Figura 40 - Umidificação da amostra compactada



Figura 41 - Pesagem das amostras recém-retiradas dos moldes cilíndricos
(a) amostra com 6% de cimento, (b) amostra com 8% de cimento e (c) amostra com 10% de cimento.



(a)

(b)

(c)

Figura 42 - Obtenção da força máxima atingida pela amostra compactada de solo-cimento em uma prensa de compressão simples.



Após a ruptura do solo, quando não há nenhum acréscimo de resistência, o molde é retirado da prensa para realizar o próximo rompimento. Foram rompidos os moldes de solo natural e de solo-cimento nos teores de 6%, 8% e 10%, todos compactados na umidade ótima.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios que foram descritos no capítulo anterior. O objetivo dos ensaios era avaliar experimentalmente a mistura de cimento e solo com vista à utilização em camadas de base de pavimentação. Esta análise pretende verificar os parâmetros de estabilidade do solo submetido a uma mistura com o cimento.

5.1 GRANULOMETRIA

O primeiro ensaio realizado foi o de granulometria. Este ensaio nos possibilita, por meio do peneiramento e da sedimentação, classificar o solo de acordo com as porcentagens de materiais que passam nas peneiras estipuladas pela ABNT. As tabelas 6, 7, 8, e 9 demonstram os resultados obtidos no processo de peneiramento e sedimentação da amostra.

Tabela 6 - Peneiramento grosso do solo

Peneiramento Grosso				
Peneira		Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
Bitola	Abertura(mm)			
2"	50,8	0,00	0,00	100,0000
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,0000
1"	25,4	0,00	0,00	100,0000
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0000
3/8"	9,5	3,35	3,35	99,7750
4	4,76	28,34	31,69	97,8713
10	2,00	69,39	101,08	93,2102

Tabela 7 - Peneiramento fino com defloculante

Peneiramento Fino				
Peneira		Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
Bitola	Abertura(mm)			
16	1,19	1,19	1,19	91,6
30	0,59	1,18	2,37	90,0
40	0,42	0,98	3,35	88,7
60	0,25	2,86	6,21	84,9
100	0,149	5,62	11,83	77,3
200	0,074	10,43	22,26	63,3

Tabela 8 - Peneiramento fino sem defloculante

Peneiramento Fino				
Peneira		Solo retido(g)	Solo retido acumulado(g)	% de material que passa
Bitola	Abertura(mm)			
16	1,19	6,03	6,03	85,1
30	0,59	8,76	14,79	73,4
40	0,42	4,30	19,09	67,6
60	0,25	7,07	26,16	58,1
100	0,149	8,20	34,36	47,1
200	0,074	9,90	44,26	33,8

Tabela 9 - Tabela de sedimentação (a) com defloculante e (b) sem defloculante.

SEDIMENTAÇÃO							
Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro n°:	59884/08
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm³)	Ld (g/cm³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	25,1	1,0260	1,0049	11,2	44,3	0,0591
1 min.	60	25,1	1,0252	1,0049	11,4	42,7	0,0420
2 min.	120	25,1	1,0243	1,0049	11,5	40,8	0,0299
4 min.	240	25,1	1,0235	1,0049	10,9	39,1	0,0206
8 min.	480	25,0	1,0231	1,0050	11,0	38,2	0,0146
15 min.	900	25,0	1,0228	1,0050	11,0	37,6	0,0107
30 min.	1800	25,0	1,0220	1,0050	11,2	35,9	0,0076
1 h	3600	24,8	1,0212	1,0050	11,3	34,1	0,0054
2 h	7200	24,4	1,0205	1,0051	11,4	32,5	0,0039
4 h	14400	24,3	1,0200	1,0051	11,5	31,4	0,0028
8 h	28800	24,0	1,0185	1,0052	11,7	28,1	0,0020
24 h	86400	22,3	1,0175	1,0055	11,9	25,3	0,0012
Massa específica da água =						1,0000	

(a) Com defloculante

SEDIMENTAÇÃO							
Massa do material úmido submetido à sedimentação M_h (g) =					70	Densímetro n.º	59884/08
tempo	tempo (s)	temp. (°C)	L (g/cm³)	Ld (g/cm³)	a (cm)	QS (%)	d (mm)
30 s	30	24,0	1,0070	0,9979	14,3	19,2	0,0674
1 min.	60	24,0	1,0050	0,9979	14,6	15,0	0,0482
2 min.	120	24,0	1,0040	0,9979	14,7	12,9	0,0343
4 min.	240	24,0	1,0020	0,9979	14,4	8,7	0,0239
8 min.	480	24,0	1,0005	0,9979	14,6	5,5	0,0171
15 min.	900	24,0	1,0000	0,9979	14,7	4,4	0,0125
30 min.	1800	24,4	0,9990	0,9978	14,8	2,6	0,0088
1 h	3600	24,9	0,9985	0,9976	14,9	1,9	0,0062
2 h	7200	25,5	0,9985	0,9974	14,9	2,2	0,0044
4 h	14400	26,0	0,9981	0,9973	15,0	1,7	0,0031
8 h	28800	26,5	0,9975	0,9971	15,1	0,8	0,0022
24 h	86400	24,8	0,9980	0,9976	15,0	0,7	0,0013
Massa específica da água =						1,0000	

(b) Sem defloculante

Com o auxílio dos resultados obtidos no peneiramento e na sedimentação, foi possível elaborar a curva granulométrica para análise e classificação do solo.

Figura 43 - Curva granulométrica com e sem defloculante

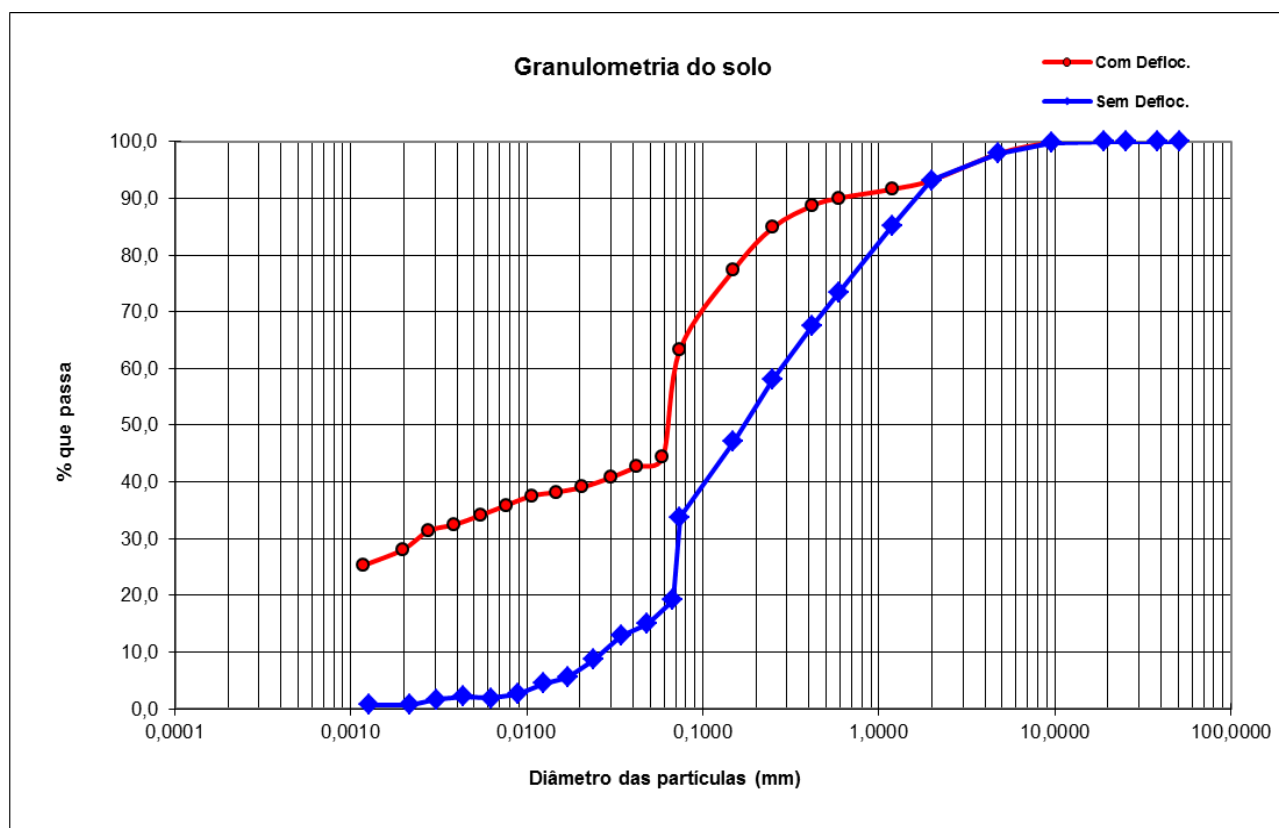


Tabela 10 - Granulometria do solo analisado

Material	Diâmetro	Sem defloculante	Com defloculante
	mm	% do material	% do material
Pedregulho grosso	20,0 a 60,0	0,00	0,00
Pedregulho médio	6,0 a 20,0	1,60	1,60
Pedregulho fino	2,0 a 6,0	5,20	5,20
Areia grossa	0,6 a 2,0	19,70	3,20
Areia média	0,2 a 0,06	20,90	8,90
Areia fina	0,06 a 0,2	35,10	36,70
Silte	0,002 a 0,06	16,80	16,30
Argila	> 0,002	0,80	28,20
Total		100,00	100,00

De acordo com a análise das curvas granulométricas feita por meio da sedimentação (Tabela 9), verificou-se que o solo submetido somente à água destilada apresentou cerca de 75,7% de partículas de areia entre 0,6 mm e 0,2 mm sendo que dessa porcentagem de areia 35,1% é classificado como areia fina, 19,7% como areia grossa e 20,9% como areia média. O solo ainda possui em sua composição 16,8% de partículas entre 0,002 mm e 0,06 mm (Tabela 10) classificando o solo como arenosiltoso. Já com a ação do defloculante, há uma maior facilidade de desagregação das partículas do solo diminuindo a porcentagem de areia e silte em relação à argila. Essa grande diferença de classificação se dá pelo fato das partículas de argila possuir uma grande dificuldade de se desagregarem. Portanto, com a adição do defloculante teremos um solo arenoso argiloso.

Para a obtenção da curva granulométrica foi preciso calcular a umidade higroscópica e a massa específica dos grãos. Os resultados obtidos foram:

Tabela 11 - Resultados para umidade higroscópica

Umidade higroscópica			
Capsula N°	18	30	4
tara (g)	14,65	15,26	13,58
tara + SH (g)	75,71	83,94	83,37
tara + SS (g)	75,22	83,02	82,79
Umidade (%)	0,80	1,35	0,82
w (%):			0,81

Tabela 12 - Resultado para massa específica dos grãos

Massa específica dos grãos # 2mm			
Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Picnômetro N°	2	1	3
Temperatura (°C)	26,1	25,9	25,8
Pic. + água (g)	693,91	669,32	619,63
Pic. + água + solo(g)	725,55	701,10	651,23
G (g/cm3)	2,75	2,77	2,75
G _s :			2,76

Os próximos ensaios realizados foram os limites de liquidez e de plasticidade, utilizados para avaliar a plasticidade do solo. Os resultados obtidos foram:

Tabela 13 - Resultados do limite de liquidez

LIMITE DE LIQUIDEZ					
<i>Dados para obtenção do Limite de Liquidez para a amostra coletada</i>					
N° da capsula	30	1	4	25	9
N° de golpes	35	29	26	20	16
tara (g)	14,32	13,95	14,43	19,41	18,73
tara + SH (g)	37,45	37,25	38,31	49,84	50,05
tara + SS (g)	31,06	30,49	31,05	40,21	39,61
Umidade (%)	38,17	40,87	43,68	46,30	50,00
WL (%):				43,36	

Figura 44 - Curva para cálculo do limite de liquidez

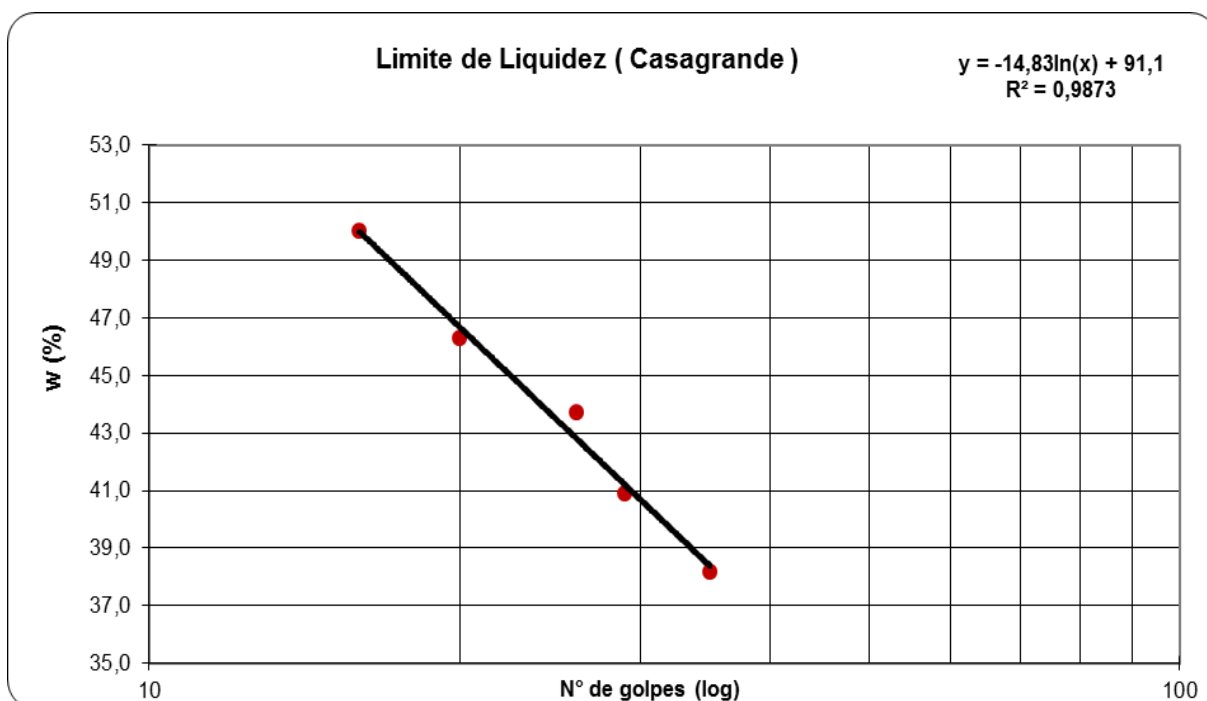


Tabela 14 - Resultados do limite de plasticidade

LIMITE DE PLASTICIDADE					
<i>Dados para obtenção do Limite de Plasticidade para a amostra coletada</i>					
Nº da capsula	1	69	85	4	23
tara (g)	5,95	5,75	5,77	5,75	5,74
tara + SH (g)	8,30	7,49	8,22	8,35	9,01
tara + SS (g)	7,73	7,08	7,63	7,73	8,23
Umidade (%)	32,0	30,8	31,7	31,3	31,3
				WP(%):	31,44

Tabela 15 - Cálculo do índice de plasticidade (IP)

ÍNDICE DE PLASTICIDADE (LL - LP)% =	11,9
--	-------------

Os valores dos limites de liquidez e de plasticidade foram obtidos através da ferramenta de cálculo do Excel. Para o cálculo do LL, após as leituras foi possível produzir a curva de umidade versus número de golpes. Na equação obtida, substituindo o valor de “x” por 25 golpes chega-se ao valor de 43,36%, correspondente ao limite de liquidez. O cálculo do limite de plasticidade foi realizado pela média aritmética dos cinco valores encontrados.

Com a análise dos resultados encontrados através dos experimentos (Tabela LL e LP) calculou-se o índice de plasticidade (Tabela 15). Desta forma, o solo arenoso apresenta IP de 11,9%, sendo classificado como medianamente plástico, conforme a tabela abaixo.

Tabela 16 - Classificação do índice de plasticidade

Classificação do IP	% do IP
Fracamente plásticos	$1 < IP < 7$
Medianamente plásticos	$7 < IP < 15$
Altamente plásticos	$IP > 15$

Fonte: (CAPUTO, 1976).

A próxima avaliação a ser realizada faz referência à classificação do tipo de solo. O sistema utilizado será o TRB, antigo HRB (*Highway Research Board*), bastante empregado na pavimentação e que considera a granulometria, limite de liquidez, o índice de plasticidade e o índice de grupo.

O índice de grupo (IG) é dado por $IG = 0,2 * a + 0,005 * a * c + 0,01 * b * d$, onde:

- $a = \% \text{ de material que passa pela } \# 200 \text{ menos } 35$; se $\% > 75$ adota-se $a = 40$; se $\% < 35$, adota-se $a = 0$.
- $b = \% \text{ de material que passa pela } \# 200 \text{ menos } 15$; se $\% > 55$ adota-se $b = 40$; se $\% < 15$, adota-se $b = 0$.
- $c = \% \text{ valor de LL menos } 40$; se $LL > 60\%$ adota-se $c = 20$; se $LL < 40\%$, adota-se $c = 0$.
- $d = \text{valor do índice de plasticidade menos } 10$; se $IP > 30\%$ adota-se $d = 20$, se $IP < 10\%$ adota-se $d = 0$.

Na classificação utiliza-se a tabela 17 abaixo :

Tabela 17 - Tabela para classificação de solos TRB.

<u>CLASSIFICAÇÃO GERAL</u>	MATERIAIS GRANULARES (35% OU MENOS PASSANDO NA PENEIRA Nº. 200)							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS (MAIS DE 35% PASSANDO NA PENEIRA Nº. 200)			
Classificação em Grupos	A – 1		A – 3	A – 2				A – 4	A – 5	A – 6	A – 7
	A – 1 – a	A – 1 – b		A – 2 – 4	A – 2 – 5	A – 2 – 6	A – 2 – 7				A – 7 – 5 A – 7 – 6
Granulometria: % passando na peneira: Nº. 10 (2,0 mm.) Nº. 40 (0,42 mm.) Nº. 200 (0,074mm.)	50 máx.										
	30 máx.	30 máx.	51 mín.								
	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Característica da fração passando na peneira no. 40: Limite de Liquidez (%) Índice de Plasticidade (%)											
				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
	6 máx.	6 máx.	NP	10máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo (IG)	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia		Areia fina	Pedregulhos ou areia siltosas ou argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30; se maior será A - 7 - 6 .

Fonte: retirado do site <http://etg.ufmg.br>, 19/11/2014.

Aplicando a metodologia acima, o valor do índice de grupo calculado foi de IG = 6,6%. Dessa forma, utilizando de todos os dados é possível encaixá-lo no grupo A-7-5, o que caracteriza o solo como um solo argiloso, encaixando-se como regular a mau para pavimentação.

5.2 COMPACTAÇÃO

Este ensaio tem por objetivo determinar a umidade ótima de compactação. Na tabela 18 a seguir, temos as dimensões, volume e peso dos moldes cilíndricos utilizados para a obtenção da umidade ótima desejada. Foram utilizados os mesmos moldes para os ensaios com mistura de 6%, 8% e 10% de cimento e natural (sem cimento). Portanto, foram adotadas as mesmas medidas para cada cilindro utilizado, sem haver reuso da amostra de material. Adiante segue os resultados obtidos.

Tabela 18 - Identificação, dimensões e peso dos moldes cilíndricos utilizados no ensaio de compactação.

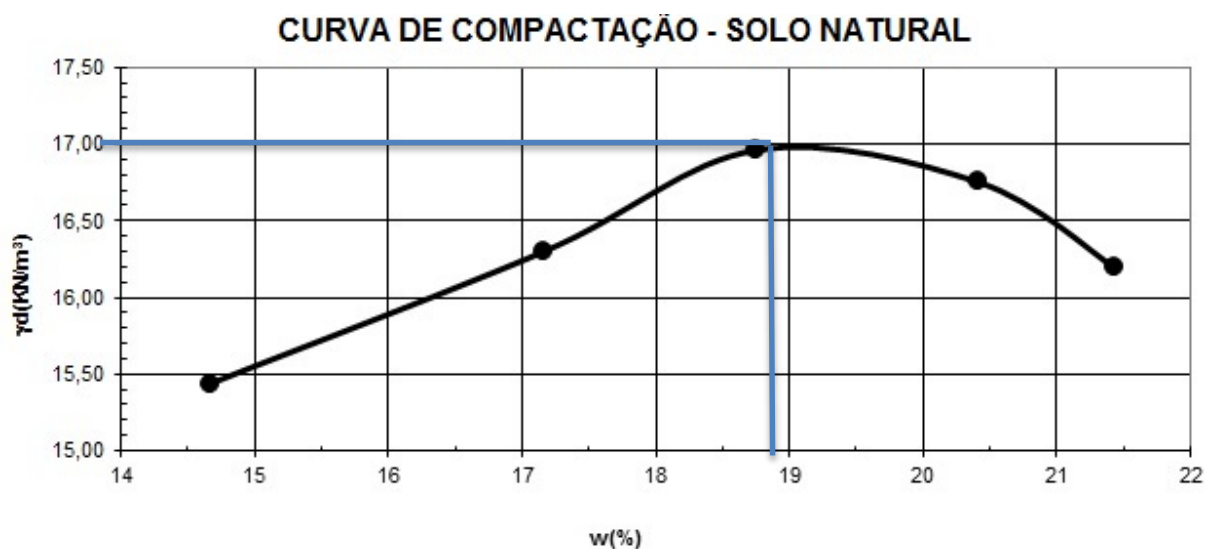
Molde N°	Altura (cm)	Diâmetro (cm)	Volume (cm ³)	Peso (g)	Cilindro
20	11,43	15,17	2065,83	4724,0	grande
12	11,42	15,19	2069,47	4748,6	grande
11	11,42	15,06	2034,20	4736,2	grande
1	11,47	15,11	2056,69	4757,5	grande
5	11,39	15,25	2080,37	4712,3	grande

5.2.1 Solo Natural (sem adição de cimento)

Tabela 19 - Umidade de compactação das amostras ensaiadas (natural).

Amostra Compactada e Molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	$\gamma_d(\text{kN/m}^3)$
20 8452,6	3	119,99	106,03	12,88	14,99	14,66	15,44
	7	116,03	103,04	13,25	14,47		
	46	100,1	89,05	13,05	14,54		
12 8777,8	32	90,35	79,25	14,39	17,11	17,16	16,30
	37	81,66	71,70	13,32	17,06		
	38	85,03	74,30	12,27	17,30		
11 8913,8	6	86,30	74,93	13,07	18,38	18,75	16,96
	5	91,61	79,26	14,02	18,93		
	2	86,50	74,91	13,74	18,95		
1 8487,7	26	69,51	59,87	13,08	20,60	20,41	16,75
	23	75,72	65,40	14,39	20,23		
	24	80,23	68,87	13,19	20,40		

Figura 45 - Curva obtida do ensaio de compactação indicando a umidade ótima para o solo natural



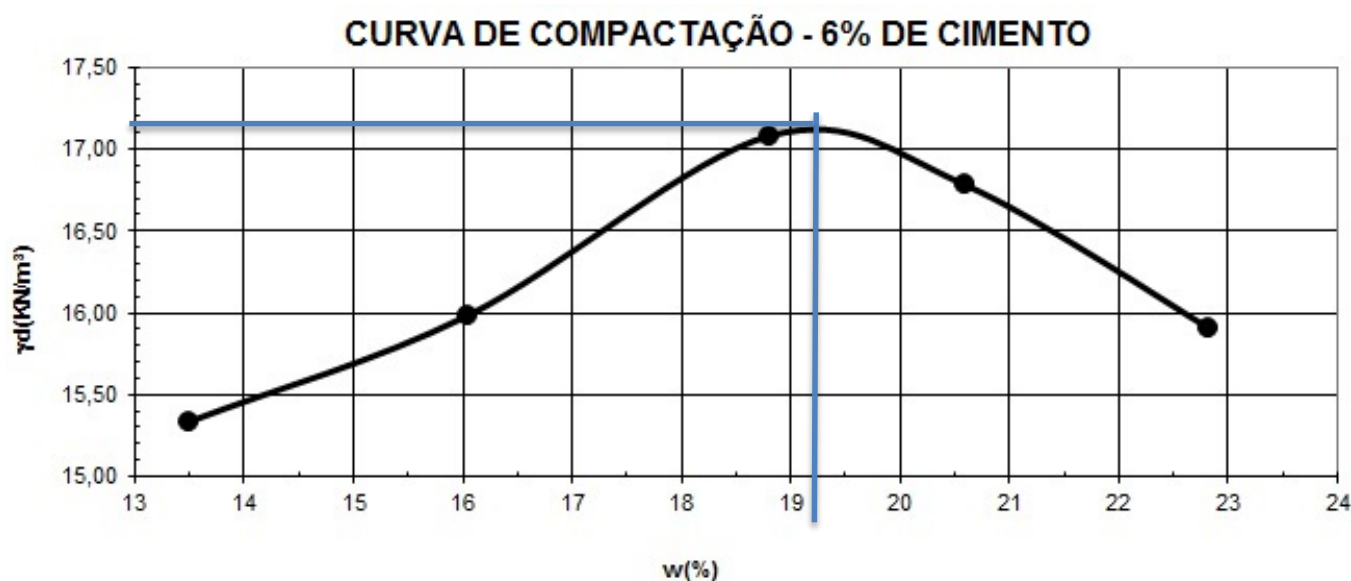
Verificou-se que o solo argiloso possui um teor de umidade ótima de compactação se aproxima dos 19,1% e uma densidade aparente seca máxima de 17,0 KN/m³ (Figura 45).

5.2.2 Solo com 6% de teor de cimento

Tabela 20 - Umidade de compactação das amostras ensaiadas com mistura de 6% de cimento.

Amostra Compactada e Molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	$\gamma_d(\text{kN/m}^3)$
11 8346	49 42 10	83,25 93,23 89,27	74,99 83,67 80,23	14,15 12,62 13,06	13,58 13,46 13,46	13,50	15,34
12 8662	8 50 4	108,04 77,92 120,96	94,88 69,04 107,01	13,56 14,01 18,73	16,18 16,14 15,80	16,04	15,98
5 9017,7	48 1 25	62,78 75,62 82,89	54,96 65,76 71,81	13,34 13,49 12,75	18,79 18,86 18,76	18,81	17,08
1 8501,6	31 28 7	74,14 95,20 107,10	63,54 81,32 92,35	12,88 14,33 19,09	20,92 20,72 20,13	20,59	16,78
20 8840	11 18 0	86,85 89,40 114,52	74,25 75,48 96,45	18,92 14,46 17,38	22,77 22,81 22,85	22,81	15,91

Figura 46 - Curva obtida do ensaio de compactação indicando a umidade ótima para o solo com mistura de 6% de cimento.



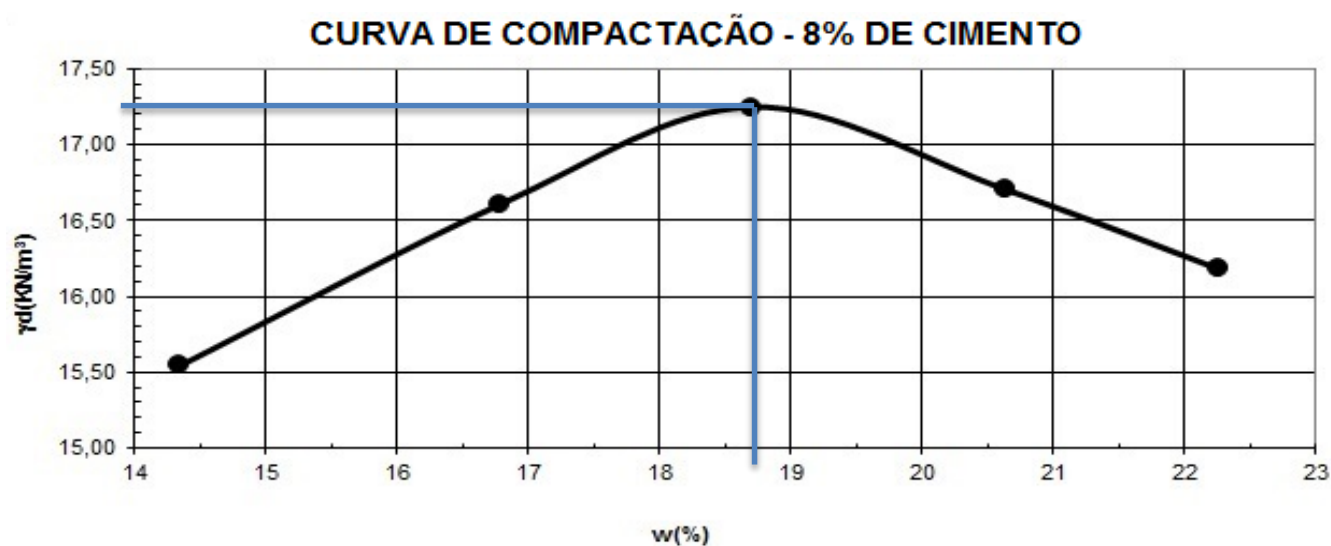
Com a mistura de 6% de cimento, pode-se notar que o teor da umidade ótima de compactação é cerca de 19,3% com uma densidade aparente seca máxima de 17,15 KN/m³ (Figura 46).

5.2.3 Solo com 8% de teor de cimento

Tabela 21 - Umidade de compactação das amostras ensaiadas com mistura de 8% de cimento.

Amostra Compactada e Molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	γ_d (kN/m ³)
20 8467,7	7 40 38	92,97 100,38 94,59	83,01 89,47 84,42	13,25 14,06 13,27	14,28 14,47 14,29	14,35	15,54
1 8325,6	9 37 16	86,76 76,79 74,77	76,34 67,63 65,91	14,32 13,30 12,92	16,80 16,86 16,72	16,79	16,61
5 9055,4	43 34 5	83,51 64,92 70,56	72,65 56,68 61,62	13,48 13,26 14,01	18,35 18,98 18,78	18,70	17,25
12 9000,9	21 35 3	66,93 71,95 68,83	57,95 61,85 59,30	14,54 13,06 12,88	20,69 20,70 20,53	20,64	16,70
11 8839,8	32 24 44	91,84 78,78 75,88	77,82 66,83 64,41	14,37 13,19 13,21	22,10 22,28 22,40	22,26	16,18

Figura 47 - Curva obtida do ensaio de compactação indicando a umidade ótima para o solo com mistura de 8% de cimento.



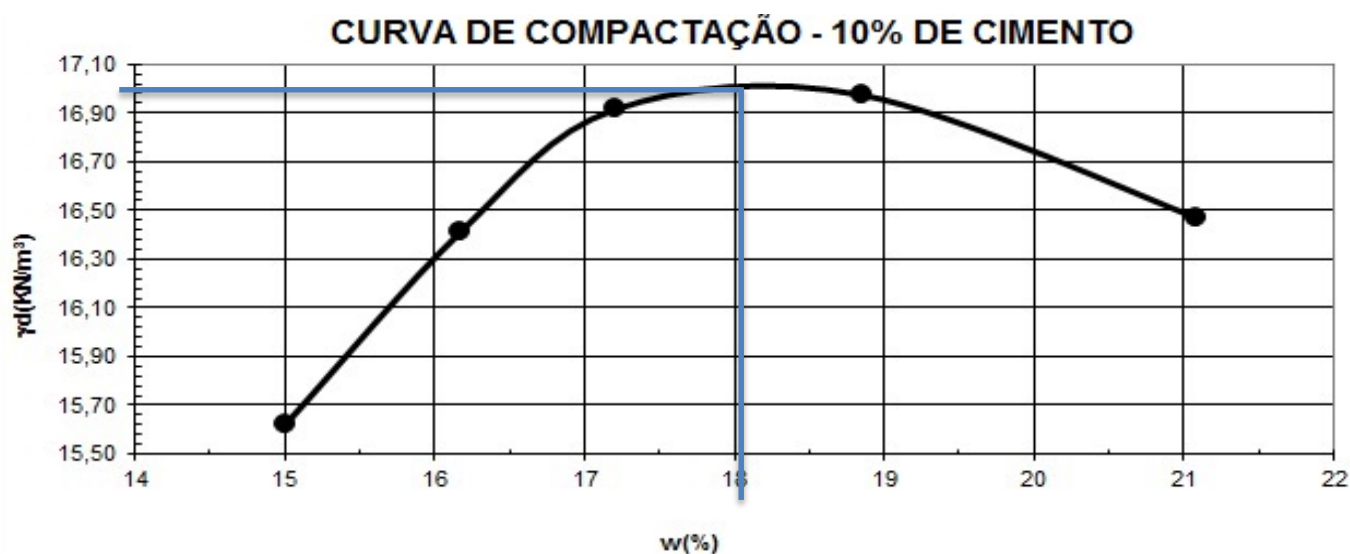
Aumentando a porcentagem de cimento para 8%, tem-se um teor de umidade ótima de compactação de aproximadamente 18,7% e uma densidade aparente seca máxima de 17,25 kN/m³ (Figura 47).

5.2.4 Solo com 10% de teor de cimento

Tabela 22 - Umidade de compactação das amostras ensaiadas com mistura de 10% de cimento.

Amostra Compactada e Molde (g)	cap. n°	Ph + T (g)	Ps + T (g)	T (g)	Umidade (%)	Umidade Média (%)	γ_d (kN/m ³)
5 8522,6	25	84,27	74,95	12,83	15,00	15,00	15,62
	50	78,65	70,25	14,02	14,94		
	49	75,25	67,25	14,13	15,06		
11 8691,1	42	95,34	83,91	14,45	16,46	16,17	16,41
	18	90,91	80,74	19,07	16,49		
	7	112,65	100,04	19,07	15,57		
1 8415	31	94,38	82,48	12,90	17,10	17,20	16,91
	8	77,24	67,91	13,55	17,16		
	4	129,89	113,46	18,73	17,34		
12 9005,6	0	88,84	77,50	17,36	18,86	18,85	16,97
	10	84,71	73,28	13,10	18,99		
	11	92,30	80,74	18,95	18,71		
20 8924,7	6	91,63	78,86	18,01	20,99	21,09	16,47
	1	82,77	70,72	13,49	21,06		
	28	69,97	60,23	14,32	21,22		

Figura 48 – Curva obtida do ensaio de compactação indicando a umidade ótima para o solo com mistura de 10% de cimento



Com adição de 10% de cimento, o teor de umidade ótima de compactação está próximo aos 18,0% e uma densidade aparente seca máxima de 17,0 KN/m³ (Figura 48).

Figura 49 - Curvas para comparação das umidades ótimas e densidades máximas com misturas de 6%, 8%, 10% e natural.

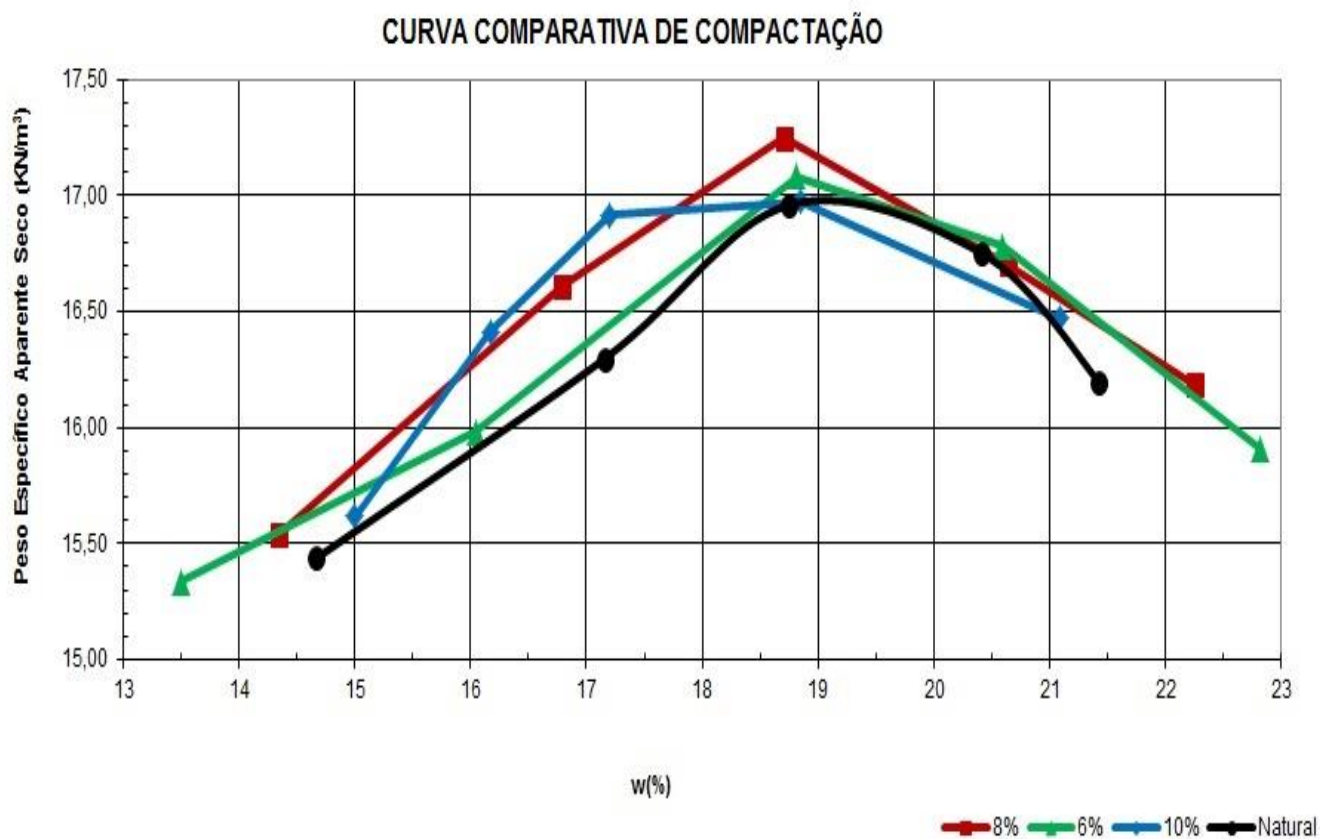


Tabela 23 - Análise comparativa das umidades ótimas e densidades das misturas de solo-cimento e natural (sem cimento).

Solo	Umidade Ótimo (%)	Densidade Aparente Seca Máxima (KN/m³)
Natural	19,1	17,0
6%	19,3	17,15
8%	18,7	17,25
10%	18,0	17,0

A partir da Figura 49 e da Tabela 23, é possível verificar uma diminuição da porcentagem da umidade ótima na medida em que houve um acréscimo de cimento na mistura. Entretanto, há uma relação inversa quanto à densidade aparente seca máxima, os valores aumentam somente até 8% de mistura de solo-cimento, havendo uma queda de 0,25 KN com 10% de cimento na mistura.

5.3 ISC – ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

Conforme descrito na metodologia de trabalho (item 4.2.3), o ensaio de CBR foi realizado de acordo com a NBR 9895/87. Entretanto, após ser realizado o ensaio de expansão das amostras de solo-cimento, houve uma grande dificuldade na tentativa de execução do ensaio de penetração, descrito anteriormente no capítulo 4 item C. Portanto, um novo procedimento foi adotado para se obter a carga máxima suportada pelas amostras compactadas.

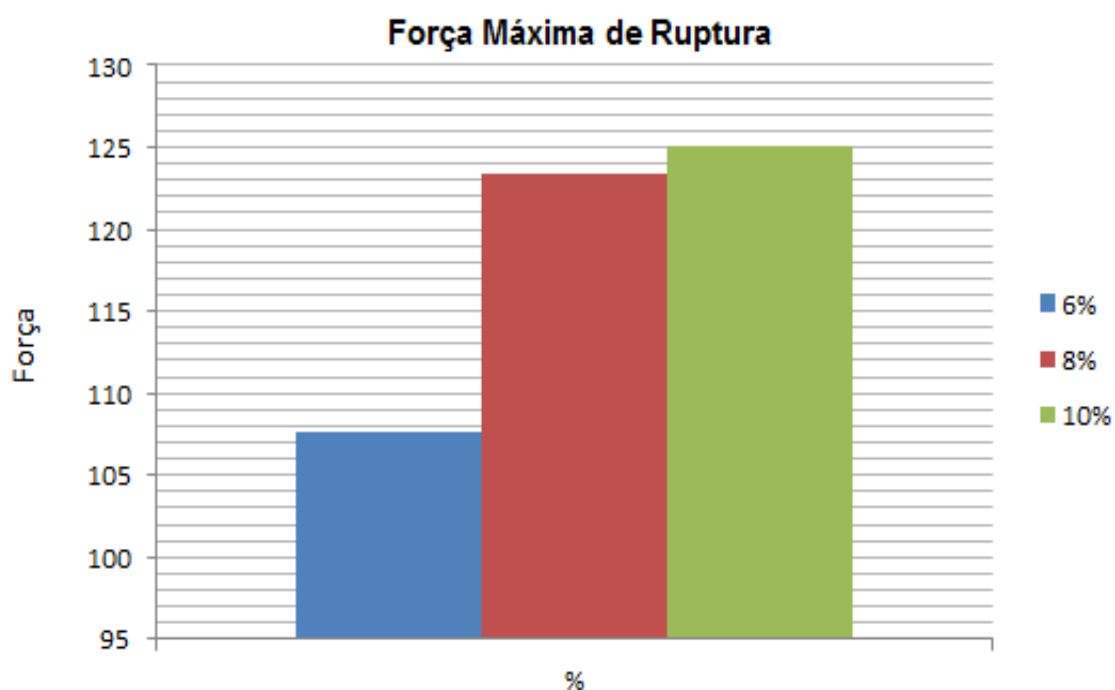
5.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

Com o ensaio de compressão simples foi possível obter em quilo newtons (KN), a força máxima estabelecida para o rompimento das amostras compactadas. Os corpos de prova que correspondem ao solo natural e o solo cimento nos teores de 6%, 8% e 10% ficaram submersos por quatro dias, período mínimo para a verificação da expansão do solo. Na tabela abaixo, obteve-se os seguintes resultados.

Tabela 24 - Relação de cargas máximas encontradas para as misturas de solo-cimento e natural.

Solo	Força Máxima (KN)
Natural	7,6
6%	107,7
8%	123,3
10%	125,1

Figura 50 - Comparação gráfica das resistências de compressão



Com base na Figura 50, nota-se uma relação entre o teor de cimento e a resistência à compressão simples, na qual o aumento do teor de cimento gera um aumento na resistência à compressão. Para fins de comparação, não foi inserido no gráfico a resistência relativa ao solo natural (sem adição de cimento), pois o valor de 7,6 KN é muito inferior aos valores referentes com adição do cimento.

5.5 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS DO SOLO

De acordo com a norma do DNIT 143/2010 – ES: Pavimentação de Base de solo-cimento – Especificação de serviço (DNIT, 2010), os solos empregados na execução de base de solo-cimento devem ser os provenientes de ocorrências de materiais, devendo apresentar as seguintes características quando submetidos aos ensaios DNER-ME 080/94, DNER-ME 082/94 e DNER-ME 122/94, conforme a tabela 25, a seguir:

Tabela 25 - Características do solo

Peneiras	Porcentagem	Tolerância
2½"	100 %	-
Nº 4	50 a 100 %	± 5%
Nº 40	15 a 100 %	± 2%
Nº 200	5 a 35 %	± 2%
Limite de liquidez	máximo 40%	
Índice de plasticidade	máximo 18%	

Fonte: (DNIT, 143/10)

De acordo com os resultados obtidos do peneiramento grosso mostrado na tabela 6 (granulometria), para a peneira de 2 ½ " temos 100% do material passante. Já para a peneira nº 4, temos 97,87% de solo passante. Em seguida, no peneiramento fino passaram-se 88,7% da amostra de solo com adição de defloculante e 67,6% sem o defloculante, ambos se encontram no intervalo permitido pela norma. Porém, na peneira nº 200 só poderiam passar 5 a 35% do material, com tolerância de 2% para mais ou para menos. A amostra com adição de defloculante apresentou 63,3% de material passante excedendo o permitido pela norma. Entretanto, a amostra sem adição de defloculante se enquadra devidamente com 33,8% de material passante.

Conforme a tabela 13, o limite de liquidez é de 43,36%, com um pouco mais de 3% além do permitido. O índice de plasticidade é de 11,7%, abaixo dos 18% estipulados pela norma.

Para finalizar o capítulo, a última análise faz referência às tensões mínimas de ruptura exigidas para que se possa utilizar a mistura solo-cimento como base em pavimentos.

A tabela 26 abaixo mostra as densidades e tensões máximas de compactação obtidas para cada porcentagem de mistura solo-cimento estudada.

Tabela 26 - Valores das densidades aparentes e tensões máximas de ruptura obtidas por meio da prensa de compactação simples.

Solo	Densidade Aparente Seca Máxima (KN/m³)	Tensão (KN/cm²)
Natural	17,0	4,4
6%	17,2	60,1
8%	17,3	68,8
10%	17,0	71,1

Referente ao critério de execução da norma DNIT 143/2010 – ES: Pavimentação de Base de solo-cimento – Especificação de serviço, a mistura de solo-cimento deve apresentar o valor mínimo de 21 kg/cm² para a resistência à compressão aos sete dias de cura. De acordo com a norma técnica, as amostras estudadas em questão ficaram quatro dias em processo de cura, os resultados alcançados demonstram que para todas as misturas de solo-cimento o requisito resistência à tensão foi atendido. Os valores das tensões para as misturas estão muito acima do exigido pela norma, exceto, o solo natural (sem adição de cimento).

As tensões foram obtidas através do cálculo de divisão das forças máximas aplicadas (Tabela 24) pela área do molde utilizado no ensaio de compactação.

6 CONCLUSÃO

Assim como nos objetivos traçados inicialmente procuramos verificar os parâmetros de estabilização do solo quando submetido a uma mistura de cimento. Com isso a pesquisa apontou resultados significativos na utilização do cimento como agente estabilizante para o solo estudado. Portanto, a partir dos ensaios laboratoriais realizados durante este período foi possível tirar as seguintes conclusões:

Após a adição do cimento e das análises, o solo areno siltoso de acordo com a classificação granulométrica, apresentou uma evolução na capacidade de suporte do solo melhorando significativamente suas propriedades. Houve um grande aumento da resistência suportada pelo material misturado de modo que atendesse os parâmetros estabelecidos por norma para o uso prático deste material em pavimentos.

Uma das grandes vantagens na melhoria do solo com o cimento é o aproveitamento do solo local, diminuindo a necessidade de empréstimo de solos extraídos de outros lugares e o descarte impróprio do material.

Verificou-se que a técnica de estabilização com o cimento pode ser uma alternativa que possibilita o uso de solos areno siltosos que não apresentam bom comportamento.

De modo geral, este trabalho abordou a possível utilização da mistura solo-cimento na base de pavimentos, apresentando uma avaliação experimental de solo e cimento, viabilizando o uso de solos que não atendem a resistência mínima exigida

na camada de base da pavimentação. Durante a revisão bibliográfica foi possível verificar que existem várias deficiências físicas nas rodovias do país. O uso do solo-cimento em proporções adequadas poderá atender os requisitos necessários para o aumento da resistência dessas vias, minimizando os gastos e aumentando sua durabilidade.

6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Buscar outros tipos de solo que apresentem características melhores para a pavimentação;

Realizar estudo de custo/benefício da base com solo-cimento quando comparada as bases estabilizadas tradicionais;

Estudar as proporções ideais do uso do solo-cimento na base para um maior aproveitamento custo-benefício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14037. Manual de operação, uso e manutenção das edificações. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 5734**. Peneiras para Ensaio. Rio de Janeiro. 1989.

_____. **NBR 6459**. Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 6508**. Grãos de Solos que Passaram na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 7180**. Solo - Determinação do limite de Plasticidade. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 7181**. Solos - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro. 1984.

_____. **NBR 6457**. Amostra de solos - Preparação para ensaio de caracterização e compactação. Rio de Janeiro. 1986.

_____. **NBR 7182**. Solos - Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro. 1986.

_____. **NBR 9895**. Índice Suporte Califórnia - CBR. Rio de Janeiro. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP (1986) ET-35. **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio**. São Paulo, SP. 51p.

ASTM – American Society for Testing and Materials. ASTM C88 – 05.

BERNUCCI et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1990). **Análise do Comportamento do Solo-Cimento Plástico para uso em Fundações**. 6ª CBGE/ IX COBRAMSEF, ABGE/ABMS, Salvador, BA, v2, p 403-408.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., v. I, 1976.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2006). **Manual de Pavimentação**. Diretoria de Planejamento de Pesquisa – IPR/DNIT, Rio de Janeiro – RJ, 274p.

_____. DNER – ME 086/94: *Agregado do índice de forma*.

_____. DNER – ME 141/01: **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente** – *Especificação de serviço*.

_____. **NORMA DNIT 138/2010 – ES: Pavimentos flexíveis – Reforço do subleito** - *Especificação de serviço*. Rio de Janeiro. 2010b.

_____. **NORMA DNIT 143/2010 - ES: Pavimentação - Base de solo-cimento - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2010a.

HEISE, A. F.(2004) **Desenho do processo e qualidade na construção do painel monolítico de solo cimento em taipa de pilão**. 138 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas,

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2006. 204 f.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MUNDIM; L. A. G; 1990. **Contribuição ao estudo do comportamento mecânico do solo-cimento plástico**. Relatório de estágio supervisionado. Documento nº G. ES. 006/90, UnB, Brasília, DF. 76.p.

NEVILLE, A. M., *Propriedades do Concreto*. São Paulo: PINI, 1997. 828p.

Pesquisa CNT de rodovias 2014: relatório gerencial. – Brasília :CNT : SEST : SENAT, 2014

ROSA, J. B.; FERREIRA, C. J.; GUIMARÃES, R. C. **Estabilização de solos com cal para uso em pavimentação**. UEG. Goiás, p. 6. 2006.

SOUSA, Alex Torres de. **Estudo de parâmetros de dois tipos de solos característicos do Distrito Federal estabilizados com cal**. 2013. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília - UniCEUB, Brasília, 2013.

SOUZA, Maurício José de. **Patologia em Pavimentos Flexíveis**. 2004. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2004.